15 - 16 novembre 2010

BRGM - Orléans
France

Recueil des actes

JOURNÉES « IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RISQUES CÔTIERS »



RECUEIL DES ACTES DES JOURNEES « IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RISQUES CÔTIERS »

15-16 novembre 2010, Orléans, France

JOURNEES
« IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RISQUES CÔTIERS »

Comité d'organisation

Nicole Lenôtre
BRGM, Orléans

Thomas Bulteau
BRGM, Orléans

Organisées par le BRGM sous l'égide de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), ces journées ont permis d'établir un état d'avancement sur les recherches menées en France sur les impacts du changement climatique sur les risques côtiers.

Quatre thèmes ont été abordés lors de ces deux jours :

- Thème 1 : Modification des forçages (houle, surcotes, élévation du niveau de la mer...)
- Thème 2 : Impacts sur les aléas (érosion, submersion marine…)
- Thème 3 : Impacts socio-économiques (perception du risque, perte d'activités, dommages et coûts engendrés…)
- Thème 4 : Transfert de la recherche vers l'appui aux politiques publiques

Elles ont également été l'occasion de restituer les résultats scientifiques des projets de recherche :

- VULSACO (VUlnerability of SAndy COast systems to climate change and human activities) – projet ANR/VMC (2007-2010)
- MISEEVA (Marine Inundation hazard exposure modeling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes) – projet ANR/VMC (2008-2011)
- CECILE (Changements Environnementaux Côtiers : Impact de l'Elévation du niveau de la mer) – projet ANR/CEP (2010-2013)

Ces journées ont réuni près de 100 participants : ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, collectivités, établissements publics, universitaires, bureaux d'études, organismes privés.

Pour en savoir plus sur les projets du BRGM dédiés aux impacts du changement climatique sur les risques côtiers :

- http://vulsaco.brgm.fr/
- www.anr-cecile.fr

Table des matières

THEME 1

Modifications des forçages

VARIATIONS REGIONALES DU NIVEAU DE LA MER RECONSTRUITES SUR LES 5 DERNIERES DECENNIES

Mélanie Becker[1], Benoit Meyssignac[2], William Llovel[3], Anny Cazenave[4], Philippe Rogel[5] et Guy Woppelmann[6]

1. LEGOS-CNRS, Toulouse, melanie.becker@legos.obs-mip.fr
2. LEGOS-CNES, Toulouse, benoit.meyssignac@legos.obs-mip.fr
3. LEGOS-CNES, Toulouse, william.llovel@legos.obs-mip.fr
4. LEGOS-CNRS, Toulouse, anny.cazenave@legos.obs-mip.fr
5. CERFACS, Toulouse, Philippe.Rogel@cerfacs.fr
6. LIENSS/CNRS, Université de la Rochelle, gwoppelm@univ-lr.fr

Introduction

L'élévation du niveau de la mer est une des principales conséquences du réchauffement climatique, qui menace de nombreuses régions côtières basses et de petites îles, très peuplées. Dans ces régions, l'élévation du niveau de la mer est amplifié par des contraintes dues à des phénomènes naturels (par exemple, l'affaissement du sol dans les zones deltaïques induit par la charge sédimentaire, les mouvements verticaux du sol dus à la tectonique, au volcanisme et au rebond post-glaciaire, etc) ou/et aux activités humaines (par exemple, l'affaissement du sol en raison du pompage des eaux souterraines et/ou l'extraction du pétrole, l'urbanisation, etc.). De plus, les observations marégraphiques, pour le dernier siècle, et les mesures du niveau de la mer à partir des missions spatiales d'altimétrie, pour les dernières décennies, ont montré que l'élévation du niveau de la mer était loin d'être uniforme, mais au contraire faisait apparaître de fortes variabilités régionales.

Il est important de connaître et de comprendre cette variabilité régionale du niveau de la mer, ses changements aux échelles interannuelles, décennales et multidécennales. Pour cela, nous avons développé une méthode de reconstruction globale des variations du niveau de la mer au cours des 5 dernières décennies (Berge-Nguyen et al. 2008; Llovel et al. 2009). Cette méthode est basée sur l'analyse statistique conjointe de séries marégraphiques et de séries temporelles de grilles de niveau de la mer issues d'un modèle de circulation générale océanique. La carte globale des tendances linéaires de la variabilité régionale du niveau de la mer reconstruit, avec cette méthode, pour la période 1950-2003 est présentée à la figure 1. En moyenne globale, la tendance linéaire est de 1.7 mm/an sur la période 1950-2003. Après, apparaissent des disparités régionales, par exemple : un fort signal positif dans le Pacifique Tropical et négatif dans l'Océan Indien.

Nous analysons plus en détail, les variations décennales/multi-décennales du niveau de la mer dans plusieurs régions océaniques : Pacifique Tropical Ouest, Océan Indien, Golfe du Mexique et région des Caraïbes. Nous nous intéressons particulièrement aux tendances sur les 50 dernières années et estimons la hausse/baisse ‗absolue' du niveau de la mer dans ces trois régions.

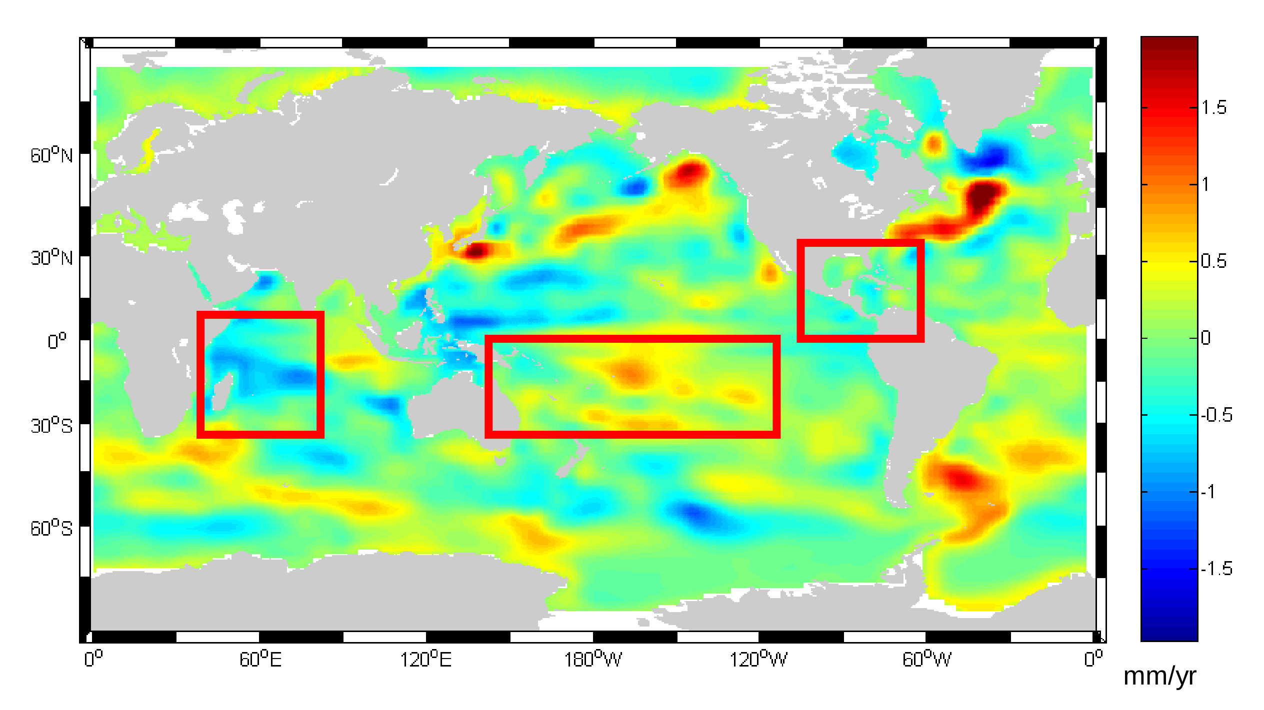


Figure 1. Variabilité régionale des tendances linéaires du niveau de la mer reconstruit sur la période 1950-2003, à partir de 99 marégraphes et du modèle de circulation générale océanique OPA/NEMO. La tendance linéaire moyenne uniforme de 1.7mm/an a été soustraite. Les cadres rouges correspondent aux régions d'études choisies : Océan Indien, Pacifique Tropical Ouest, Golfe du Mexique et région des Caraïbes.

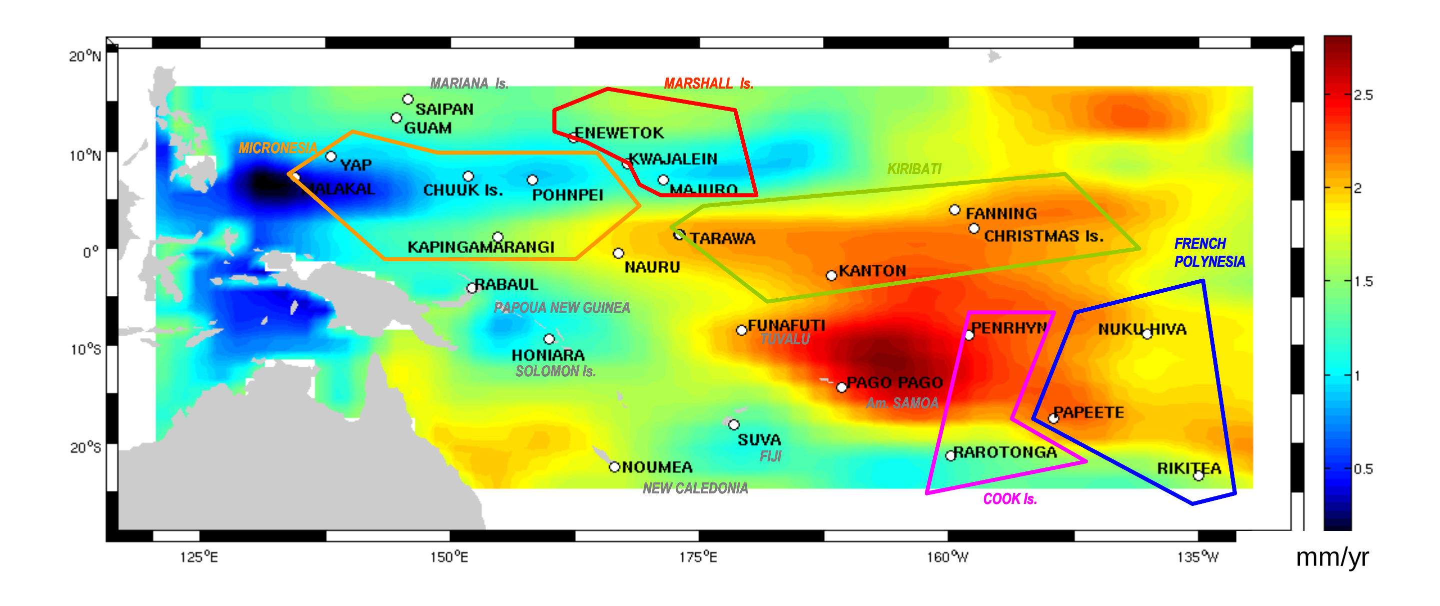


Figure 2. Pacifique Tropical Ouest : Variabilité régionale des tendances linéaires du niveau de la mer reconstruit sur la période 1950-2003. Les ronds blancs correspondent aux emplacements des séries marégraphiques disponibles dans cette région. .

Les comparaisons de tendances, réalisées avec les valeurs issues d'enregistrements marégraphiques, non utilisés dans la reconstruction, montrent un bon accord, ce qui permet de valider les résultats de la reconstruction. Sur la période altimétrique (depuis 1993), nous observons aussi un bon accord entre la variation régionale du niveau de la mer issue de la reconstruction et l'observation basée sur l'altimétrie spatiale.

Des tendances, sur les 50 dernières années, très positives du niveau de la mer -supérieures à la hausse moyenne globale du niveau de la mer sur cette période (~1.7mm/an)- sont mises en évidence pour certaines îles du Pacifique Ouest : les îles Samoa, les Tuvalu et les Kiribati, avec des tendances linéaires positives de l'ordre de 2 à 3 mm/an (Figure 2). Dans d'autres régions, notamment dans la région des îles du Pacifique Sud, nous observons des tendances linéaires du niveau de la mer très faible : pour les îles Marshall et celles de Micronésie, avec des tendances linéaires positives de l'ordre de 0 à 1 mm/an (Figure 2).

Une analyse en EOF (Empirical Orthogonal Functions) est effectuée pour cette région d'étude, les îles du Pacifique Ouest, afin d'estimer le signal interannuel et décennal superposé à la tendance, ainsi que la structure régionale de ce signal. Des comparaisons avec des vitesses verticales (Bouin & Wöppelmann 2010; Wöppelmann et al. 2009), issues de stations GPS colocalisées avec certains marégraphes (Funafuti, Papeete, Nouméa, etc), permettent de réévaluer la vitesse à long terme de variation du niveau de la mer dans un référentiel absolu (donc comparable aux variations données par l'altimétrie sur 17 ans). Des comparaisons avec des données d'expansion thermique permettent d'estimer la part du réchauffement de l'océan aux variations régionales observées du niveau de la mer.

Cette étude est réalisée dans le cadre de l'ANR ‗CECILE' « Changements Environnementaux Côtiers : Impacts de l'Elévation du niveau de la mer ».

Berge-Nguyen, M. et al., 2008. Reconstruction of past decades sea level using thermosteric sea level, tide gauge, satellite altimetry and ocean reanalysis data. *Global and Planetary Change*, 62(1-2), p.1-13.

Bouin, M.N. & W\öppelmann, G., 2010. Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, 180(1), p.193–209.

Llovel, W. et al., 2009. 2-D reconstruction of past sea level (1950–2003) using tide gauge records and spatial patterns from a general ocean circulation model. *Clim. Past*, 5, p.1–11.

Wöppelmann, G. et al., 2009. Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophysical Research Letters*, 36(12), p.L12607.

Modélisation du niveau de la mer dans les expériences décennales et centennales du modèle couplé CNRM-CERFACS

Rogel, Philippe[1], David Salas Y Mélia[2]

[11]*URA1875/CERFACS/CNRS, Toulouse, France,* rogel@cerfacs.fr
[2] Centre National de Recherche Météorologique, *Toulouse, France,* david.salas@meteo.fr

Composante climatique du niveau de la mer

Nous nous intéressons ici à la composante climatique des variations du niveau de la mer. C'est à dire celle qui est due aux fluctuations de la circulation océanique, à la réorganisation des densités au sein de l'océan sous l'effet des transports de chaleur et de sel, et aux échanges de masse entre l'océan et les autres réservoirs (cryosphère, sols, atmosphère). Pour résumer, nous ne nous intéressons qu'à l'écart entre le niveau de la mer et le géoïde, et nous laissons de côté les fluctuations de celui-ci, ainsi que les mouvements de la Terre solide et leurs effets, en gardant bien sûr à l'esprit les incertitudes associées à ces phénomènes. La raison de ce parti pris est que c'est cette grandeur seule qui est accessible par la modélisation de l'océan, tant pour les besoins opérationnels que climatiques. Enfin la spécificité du climat (grandes échelles de temps et d'espace) nous conduit à négliger également des phénomènes rapides, marées, ondes internes etc...

Modèles et projections climatiques

Les modèles numériques de simulation du climat résolvent les équations du mouvement et des lois physiques pertinentes, sur des grilles de discrétisation relativement grossières (de l'ordre de la centaine de kilomètres). Ces modèles numériques apportent des informations utiles pour la connaissance des mécanismes de variation climatique du niveau de la mer, de sa répartition géographique, de ses évolutions passées. Ils permettent de faire des projections de son évolution future, et d'éclairer les incertitudes associées à ces projections.

Résultats récents depuis le 4ème rapport de l'IPCC

Les projections d'évolution du niveau moyen de la mer du rapport de l'IPCC de 2007 (entre 19 et 59 cm d'élévation à l'horizon 2100, Meehl et al., 2007) sont basées sur la génération de modèles utilisée au début des années 2000. Ces projections ont depuis été fortement discutées. La capacité limitée de ces modèles à reproduire les tendances récentes observées, et la mise de côté de certaines sources d'incertitudes en sont clairement des limitations (Ramhstorf, 2007). En particulier, la connaissance des contributions des deux calottes polaires, non prises en compte alors, ont beaucoup progressé depuis grâce aux observations par satellite (Bindoff et al., 2007, Cazenave and Llovel, 2009). Il est donc probable que ces estimations seront réévaluées significativement lors du prochain rapport.
Les variations régionales du niveau de la mer, et leurs projections, ont également fait l'objet de travaux récents et novateurs (Paerdens et al., 2010). Mais la complexité des modèles et de leur validation, associée à la densité spatio-temporelle, relativement pauvre, des observations régionales de niveau de la mer sur une période pertinente, font que la distribution géographique des variations du niveau de la mer est peu contrainte, et cela explique en partie la très grande diversité des projections régionales. Plus précisément, la structure géographique des projections est très dépendante de la famille de modèles utilisés.

CMIP5 et le prochain rapport de l'IPCC : Projections centennales/décennales

Dans ses grandes lignes, l'exercice international d'intercomparaison des modèles climatiques (CMIP5) en cours dans le cadre de la préparation du prochain rapport du GIEC a été assez substantiellement modifié par rapport à ses prédécesseurs. Il est divisé en plusieurs parties, notamment : des simulations du XXème siècle, des projections pour le XXIème, pour lesquelles de nouveaux scénarios ont été construits, et des expériences de prévisibilité décennales (encore dites «prévisions à court terme »). En termes de projections, cet exercice de prévision décennale permettra de mieux estimer les erreurs structurelles des modèles, et donc de mieux comprendre la dispersion des projections. Dans le rapport final, le niveau de la mer aura un chapitre dédié.

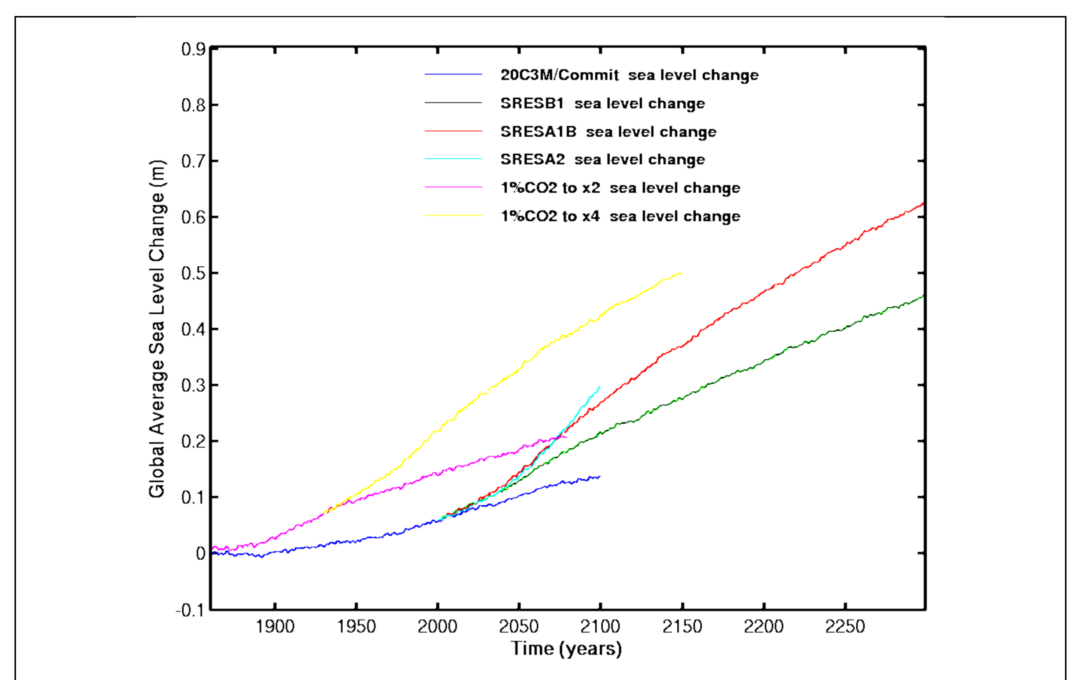


Figure 1: Evolution du niveau moyen de la mer dans différents scénarios SRES du modèle CNRM-CM3, utilisé dans le cadre du 4ème Rapport de l'IPCC.

Modèle couplé CNRM-CM5 et projet ANR-CECILE

La version la plus récente du modèle CNRM-CERFACS (dénommée CNRM-CM5), a fait l'objet de nombreuse amélioration par rapport à celle du 4ème rapport (Figure 1). De nombreux progrès en termes de résolution, d'amélioration des différents composants (notamment atmosphérique) et de diagnostiques ont été intégrés. En ce qui concerne le niveau de la mer, qui devient une variable pronostique du modèle, une attention particulière a été portée sur la fermeture du bilan d'eau douce, afin de le conserver. Le calcul des différentes contributions au niveau de la mer est effectué de manière rigoureuse.

Les expériences décennales nécessitent une étape intermédiaire, dite d'initialisation, qui consiste à contraindre explicitement le modèle couplé par les observations océaniques de température et de salinité afin d'avoir des conditions initiales les plus réalistes possibles. La figure 2 montre comment le niveau de la mer, qui est indépendant, est reproduit par cet exercice d'initialisation.

L'intérêt de ces expériences pour l'étude du niveau de la mer sera, outre de fournir une estimation plus précise pour les décennies à venir, de permettre une meilleure estimation de la signature du changement climatique, en la déconvoluant de la variabilité décennale, et donc une meilleure interprétation des projections en fin de siècle, ainsi que de leur dispersion.

Ce modèle est actuellement utilisé pour effectuer les deux types d'expériences. Les expériences centennales sont produites par le CNRM, et les expériences décennales par le CERFACS. La banque de données de niveau de la mer correspondant à ces expériences sera mise à disposition à la communauté nationale grâce au projet ANR-CECILE.

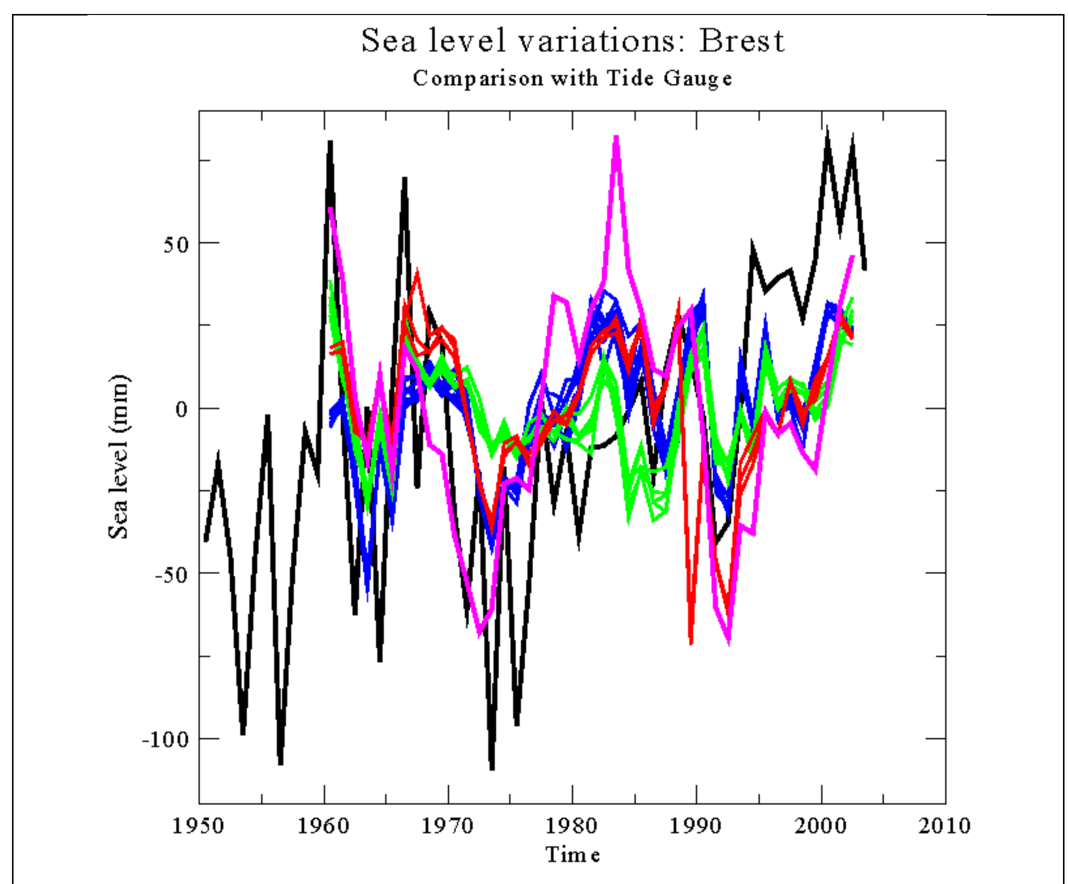


Figure 2: Réanalyses du niveau de la mer obtenues par assimilation de données de température et salinité dans des modèles globaux de circulation de l'océan (noir : observations marégraphiques, bleu : CERFACS ; vert : ECMWF ; rouge : INGV ; violet : Metoffice). L'exemple pris ici est le marégraphe de Brest.

Incertitudes

Comme mentionné plus haut, la question des incertitudes associées aux projections, tant pour le niveau moyen des océans que pour les tendances régionales, est centrale. D'une part l'impact des estimations récentes du bilan de masse des calottes polaires modifie sensiblement la vision du bilan actuel (Cazenave et al., 2009) et donc des projections. D'autre part, des estimations de l'impact régional de tels phénomènes en est à ses débuts (Stammer, 2008). Ceci implique que les modèles utilisés pour les projections futures prennent en compte cette source d'incertitude. C'est ce qui sera fait par exemple dans le cadre des projets ANR-CECILE et EU-FP7-COMBINE. Il est en effet prévu de mettre en place un modèle de calotte polaire et de mener des expériences de sensibilité. D'autre part l'utilisation du système couplé de prévision décennale pour caractériser les modes de variation du niveau de la mer en réponse à des flux d'eau typiques associés à ces phénomènes sera également menée.

References :

Bindoff N, Willebrand J, Artale V, Cazenave A, Gregory J, et al. 2007. Observations: Oceanic climate andsea level. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. S Solomon, et al. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.

Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, Berthier E, Llovel W, et al. 2009. Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. *Glob. Planet. Change* 65:83–88, doi:10.1016/j/gloplacha.2008.10.004

Cazenave,A., and W. Llovel, Contemporary Sea Level Rise, *Annu. Rev. Mar. Sci*. 2010. 2:145–73, 2009.

Church, J.A., N.J. White, T. Aarup, W.S. Wilson, P.L. Woodworth, C.M. Domingues, J.R. Hunter & K. Lambeck (2008), Understanding global sea levels: past, present and future. *Sustainability Science*, Special Feature: doi:10.1007/s11625-008-0042-4.

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, et al., 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Pardaens, A. K., J. M. Gregory, J. A. Lowe A model study of factors influencing projected changes in regional sea level over the twenty-first century, *Clim. Dyn*., DOI 10.1007/s00382-009-0738-x, 2010.

Rahmstorf S. 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea level rise. *Science* 315:368 Stammer D. 2008. Response of the global ocean to Greenland and Antarctica melting. *J. Geophys. Res.* 113:C06022, doi:10.1029/2006JC001079.

ETATS DE MER ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

SIMULATIONS DES ETATS DE MER DANS L'OCEAN ATLANTIQUE DE 1960 A 2100 POUR TROIS SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

David Morellato[1#], Michel Benoit[2], Anne-Laure Tiberi-Wadier[1]

[1] Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 Plouzané Cédex, France, *david.morellato@developpement-durable.gouv.fr* *anne-laure.tiberi-wadier@developpement-durable.gouv.fr*

[2] Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, Université Paris-Est (laboratoire de recherche commun EDF R&D, CETMEF et Ecole des Ponts ParisTech), 6 quai Watier, BP 49, 78401 Chatou Cédex, France, *michel.benoit@edf.fr* ou *michel.benoit@saint-venant-lab.fr*

Résumé :
A partir de champs de vents issus du modèle climatologique couplé ECHAM5/MPIOM ayant simulé les scénarios B1, A1B, et A2 définis par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), des simulations prospectives d'états de mer ont été effectuées sur le nord-est de l'Océan Atlantique pour la période 2000-2100. Les simulations ont été réalisées avec le code d'état de mer TOMAWAC sur la grille de calcul dite « océanique » ayant servi à la construction par simulations rétrospectives (*hindcast*) de la base de données d'états de mer ANEMOC, couvrant la période 1979-2002 et possédant une résolution raffinée à l'approche des côtes françaises (Atlantique, Manche, Mer du Nord).
Pour les présentes simulations forcées par des données du modèle ECHAM5/MPIOM, après un calage du modèle sur la période 1979-2000 par rapport aux résultats de la base ANEMOC, des moyennes et des quantiles de la hauteur significative spectrale des vagues (H_{mo}) sont calculés sur différentes périodes, dans le but de mettre en évidence des effets liés au changement climatique sur la variabilité spatiale et temporelle des états de mer en fonction des scénarios simulés.
Les analyses des simulations effectuées mettent en évidence les tendances générales suivantes:
- une légère diminution de la valeur moyenne de la hauteur H_{mo} sur la façade Atlantique, et une légère augmentation sur la Mer du Nord ;
- une légère augmentation des valeurs extrêmes de cette hauteur H_{mo} ;
- une faible diminution de la fréquence des tempêtes, mais une augmentation sensible de leur intensité. De plus, ces tempêtes remontent sensiblement vers le nord ;
- une saisonnalité plus marquée, avec une légère augmentation des valeurs moyennes et extrêmes pour la saison hivernale et une diminution nette pour la saison estivale.
Ces tendances sont d'autant plus marquées que le scénario de changement climatique du GIEC est pessimiste (tendances du scénario A2 plus marquées que celles du scénario A1B, elles-mêmes plus marquées que celles du scénario B1).

1. Introduction
1.1. Rappels sur la base de données ANEMOC.

[#] Adresse actuelle : DREAL Midi-Pyrénées, Cité Administrative, Bât. G, 2 boulevard Armand Duportal, BP 80002, 31074 Toulouse Cédex 9, France

Au cours des dernières années, le CETMEF et le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de EDF R&D ont collaboré pour construire, à partir de simulations numériques rétrospectives (*hindcast*) une base de données continue d'états de mer couvrant le nordest de l'Océan Atlantique, la Manche, la Mer du Nord et la Mer Méditerranée (Benoit & Lafon, 2004; Benoit *et al.,* 2008; Morellato & Benoit, 2009). Cette base de données, appelée ANEMOC pour « Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers », couvre une période de temps allant du 1er Janvier 1979 au 31 Août 2002. Les forçages météorologiques utilisés étaient les champs de vent à 10 m issus de la réanalyse ERA-40 du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT ou ECMWF), avec une résolution spatiale de 0.5° et un pas de temps de 6 h. Les modèles de la base ANEMOC ont été calibrés et validés par comparaison avec les mesures de houlographes de la base de donnée CANDHIS du CETMEF (Benoit *et al.*, 2008).
Une partie des résultats obtenus pendant ce projet est disponible sur le site Internet ANEMOC: http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/anemoc.

1.2. Objectifs de la présente étude.

La base ANEMOC a permis d'améliorer les connaissances sur la climatologie actuelle des états de mer, sur la base de simulations rétrospectives d'une période de temps récente et en utilisant des données de forçages issues d'une réanalyse météorologique.
La simulation numérique peut aussi être utilisée en mode prospectif dans le but d'étudier les effets potentiels du changement climatique sur la climatologie des états de mer. Dans ce cas, on force le modèle d'états de mer non plus par des données issues de réanalyses météorologiques, mais par des données issues de modèles climatiques. Le travail présenté ici a consisté à utiliser les champs de vents issus de simulations climatiques réalisées au Max Planck Institut (MPI) (Allemagne) pour forcer le modèle de calcul ayant servi à la construction de la base ANEMOC, afin d'examiner les impacts du changement climatique sur l'évolution de la climatologie des vagues dans le nord-est de l'Océan Atlantique. A partir du quatrième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), le MPI a en effet réalisé un certain nombre de simulations de scénarios de changement climatique avec le modèle couplé ECHAM5/MPIOM sur la période 1960-2100.

2. Méthodologie employée pour les simulations prospectives

2.1. Présentation succincte du modèle numérique utilisé.

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel spectral de troisième génération TOMAWAC (Benoit *et al.,* 1996). TOMAWAC résout l'équation d'évolution de la densité spectro-angulaire d'action d'onde (e.g. Bretherton & Garret, 1969; Komen *et al.,* 1994) et modélise l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel de l'état de mer, sous des conditions instationnaires de forçage par les vents.
Le maillage utilisé correspond à la grille dite « océanique » de la base ANEMOC (Benoit *et al.*, 2008). Il couvre la partie nord de l'Océan Atlantique et comprend 2279 nœuds et 4218 éléments, avec une résolution de l'ordre de 1° au large et se raffinant à l'approche des côtes françaises, où elle atteint environ 20 km. Ce modèle est utilisé sans conditions de vagues incidentes aux limites.
En chaque nœud de la grille de calcul, le spectre des vagues est discrétisé en 21 fréquences (entre 0.04 et 0.4 Hz) et en 36 directions (résolution angulaire constante de 10°). Le modèle a été utilisé avec un niveau marin stationnaire correspondant au niveau moyen de la marée, et sans prise en compte des courants de marée ou océaniques.

2.2. Les champs de vent utilisés comme données de forçage.

Pour cette étude, nous avons utilisé les champs de vents à 10 m obtenus par le MPI avec le modèle climatologique couplé ECHAM5/MPIOM sur la période de 1960 à 2100. Ces champs de vent ont une résolution spatiale de 1.8° et sont disponibles toutes les 6 h.

La simulation dite « C20 » sur la période 1960-2000 vise à modéliser globalement les phénomènes, i.e. la chronique temporelle des vents simulée ne correspond pas exactement à la chronique réellement observée.

Pour la période de 2001-2100, trois scénarios sont simulés, repérés par B1, A1B et A2. Ces scénarios correspondent à trois évolutions possibles du taux de CO2 dans l'atmosphère au cours du XXIème siècle (cf. figure 1).

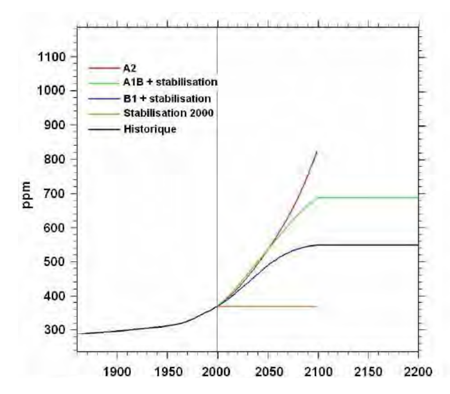


Figure 1 : Évolution de la concentration en CO2 dans l'atmosphère pour les différents scénarios de changement climatique

2.3. Calage effectué sur la période 1979-2000.

Les hauteurs de vague issues de la simulation C20 ont été comparées à celles de la base ANEMOC sur la période 1979-2000. Un calage statistique des vents a été réalisé : une augmentation de la vitesse des vents de 6 % permet d'ajuster en moyenne les hauteurs de vagues issues de la simulation C20 aux hauteurs de vagues de la base ANEMOC. Cette augmentation de la vitesse des vents de 6 % est appliquée à l'ensemble des simulations, y compris aux simulations prospectives des scénarios B1, A1B et A2.

3. Présentation des résultats et discussion

3.1. Analyses statistiques effectuées.

Pour quantifier les effets du changement climatique sur l'évolution de la climatologie des états de mer, diverses analyses sont effectuées pour les trois scénarios simulés :

- calculs de la valeur moyenne de la hauteur des vagues et des valeurs associées aux quantiles 50%, 70%, 95%, 97% et 99% de la distribution des hauteurs de vagues, sur des périodes mensuelles, annuelles, décennales et trentennales et centennales ;
- calcul du nombre moyen de tempêtes par an ;
- répartition des directions moyennes et des directions pour une hauteur des vagues dépassant Q99 sur des périodes de 30 ans.

3.2. Résultats principaux.

Quelques résultats sont présentées sur les figures ci-après :

- Figure 2 : évolution de la climatologie moyenne (valeur moyenne de la hauteur Hmo) par rapport à la période de référence 1960-2000.
- Figure 3 : évolution de la climatologie des plus forts évènements de tempêtes (basée sur la hauteur Hmo du quantile 99% de la distribution des hauteurs de vagues);

L'analyse de l'ensemble des résultats fait ressortir les tendances générales suivantes :

- Les évolutions de la hauteur des vagues Hmo sont d'autant plus marquées que le scénario est pessimiste (évolutions du scénario B1 moins marquées que celles du scénario A1B, elles-mêmes moins marquées que celles du scénario A2).
- Les évolutions sont d'autant plus marquées que l'on avance dans le XXIème siècle.

- Les régions maritimes situées au nord et au nord-est de la France voient la moyenne annuelle des hauteurs de vagues augmenter (figure 2) : les hauteurs augmentent jusqu'à 5 % en valeurs relatives.

- Les régions situées à l'ouest (façade atlantique et Golfe de Gascogne) voient la moyenne annuelle des hauteurs des vagues diminuer (figure 2) : les hauteurs diminuent jusqu'à 5 %.

- Quelle que soit la région considérée, les valeurs extrêmes annuelles des hauteurs de vagues augmentent (cf. figure 3) : les hauteurs augmentent de 1 % le long de la côte Atlantique et de 5 % à 8 % le long des côtes de la Manche et de la Mer du Nord.

- Les tempêtes sont légèrement moins nombreuses, mais sensiblement plus fortes sur les côtes françaises.

- L'analyse mensuelle des quantiles montre une saisonnalité été-hiver plus marquée : le long des côtes françaises, les hauteurs de vagues augmentent jusqu'à +10% les mois d'hiver et diminuent jusqu'à -25% les mois d'été.

- Il n'est pas observé, à cette échelle de modélisation, d'évolution significative de la direction de propagation moyenne des vagues.

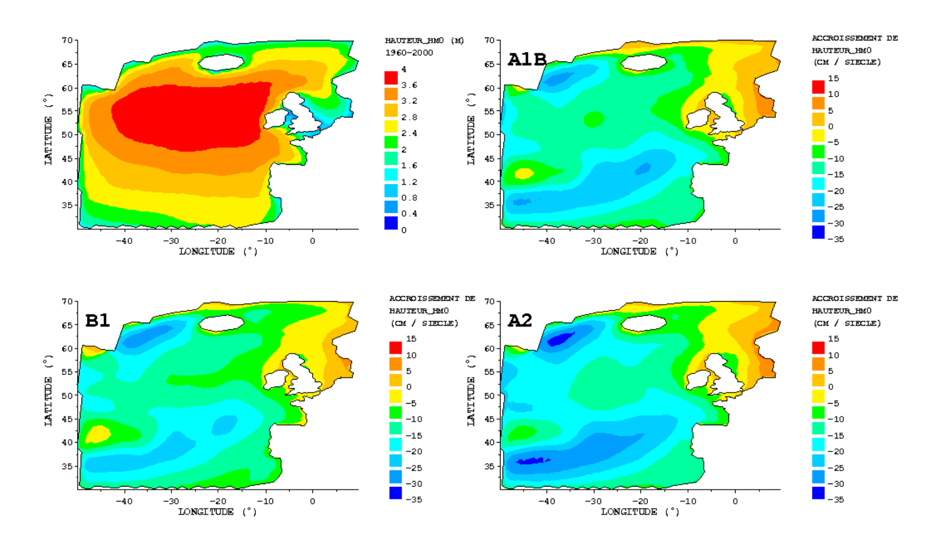


Figure 2 : Évolution de la moyenne de hauteur Hmo par rapport à la période 1960-2000

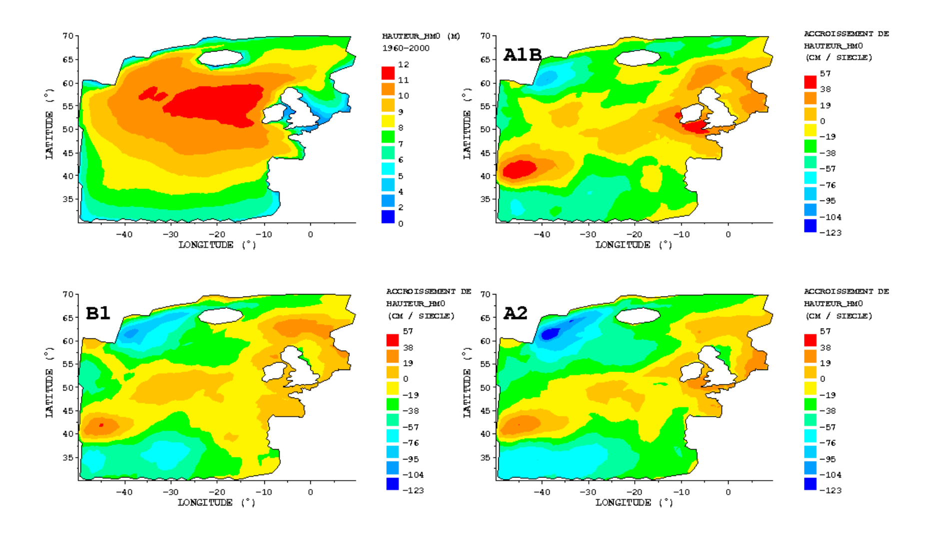


Figure 3 : Évolution du quantile 99 de la hauteur Hmo par rapport à la période 1960-2000

4. Conclusions préliminaires et perspectives

Ce premier travail de simulation prospective de l'évolution de la climatologie des vagues a été réalisé à titre exploratoire. Il permet cependant d'identifier des tendances d'évolution potentielle des valeurs moyennes des hauteurs d'état de mer, ainsi que de l'intensité et de la fréquence des tempêtes. Un certain nombre de développements et d'améliorations sont actuellement envisagés pour la suite de ces travaux réalisés au sein du Laboratoire Saint-Venant (s'appuyant notamment sur une thèse engagée début octobre 2010), dans le but de confirmer et préciser les tendances mises en évidence sur ce jeu de simulations.

5. Bibliographie

Bretherton F. P. et Garret C.J.R. (1969). *Wavetrains in inhomogeneous moving media*. Proc. Royal Society London, Series A, 302, 529-554.

Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. et Janssen P.A.E.M. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge Univ. Press, 532 p.

Benoit M., Marcos F. et Becq F. (1996). *Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing.* Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1996), Orlando (Floride, USA), 465-478.

Benoit M. et Lafon F. (2004). *A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modelling of wave climate over 25 years*. Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2004), Lisbonne (Portugal), 714-726.

Lafon F. et Benoit M. (2006). *Estimation of extreme wave conditions from hindcast simulations with application to the wave climate along French coasts*. Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2006), San Diego (Californie, USA), 739-751.

Benoit M., Lafon F. et Goasguen G. (2008). *Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 23 ans. Base ANEMOC en Atlantique – Manche – Mer du Nord*. European Journal of Env. and Civil Eng., Vol. 12/1-2, 35-50.

Morellato D. et Benoit M. (2009). *Construction d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises méditerranéennes par simulations rétrospectives couvrant la période 1979-2008*. Actes de la 1ère Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, 2-4 décembre 2009, Hammamet (Tunisie). [URL = http://www.paralia.fr/cmcm/e01-37.pdf].

Tendances et variabilité des caractéristiques des vagues dans le Golfe de Gascogne de 1958 à 2001

Elodie Charles[1,2], Déborah Idier[1], Jérôme Thiébot[1], Gonéri Le Cozannet[1], Rodrigo Pedreros[1]
Fabrice Ardhuin[3], Serge Planton[2]

[1]BRGM, Service RNSC, 3 av. C. Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2
e.charles@brgm.fr, d.idier@brgm.fr, j.thiebot@brgm.fr, g.lecozannet@brgm.fr, r.pedreros@brgm.fr
[2]Centre National de Recherches Météorologiques, 42 av. G. Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1
serge.planton@meteo.fr
[3]Ifremer, Centre de Brest, 29280 Plouzané
fabrice.ardhuin@ifremer.fr

Abstract :
Climate change impact on wave conditions is of many concerns, regarding off-shore and coastal hazards. The present paper investigates the wave climate multi-decadal trends and inter-annual variability in the Bay of Biscay during the past decades (1958-2001). Wave fields are computed with a wave modelling system based on WAVEWATCH III code and forced by ERA-40 reanalysis wind fields. A solid validation of the wave model and a fine spatial resolution (10 km in the Bay of Biscay) allow the use of computed wave fields in the analysis of wave climate trends and variability in deep and intermediate water depths. Examination of seasonal mean and extreme wave conditions highlights no significant trend in the Bay of Biscay, except for summer wave fields from 1970 to 2001, exhibiting a significant wave height increase of about 0.5 cm/y at Biscay buoy. The high inter-annual variability of wave conditions in the Bay of Biscay is studied regarding its relationship with northern hemisphere teleconnection patterns. A strong correlation of wave characteristics with the North Atlantic Oscillation and the East Atlantic pattern indices is underlined, as well as with other teleconnection patterns, appearing to be linked to certain seasonal wave conditions. Most of these relations can be explained by the atmospheric circulation anomalies associated to teleconnection patterns.

1. Introduction

Les vagues sont un paramètre important dans l'étude des risques naturels, en particulier des risques côtiers. Le changement climatique est susceptible de modifier les conditions de vagues et donc d'impacter la vulnérabilité du littoral. Cette étude propose de mieux comprendre l'évolution passée de ce forçage marin le long des côtes françaises bordées par le Golfe de Gascogne.

Au large des côtes, différentes études ont noté une tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues dans le bassin Atlantique Nord (Bacon et Carter 1991) et plus localement dans le Golfe de Gascogne (Dodet et al. 2010, Le Cozannet et al. 2010) durant les dernières décennies. La forte variabilité interannuelle des vagues a également été notée dans ces études et s'est trouvée être fortement corrélée aux variations des indices des structures de téléconnection de l'Atlantique Nord tels que l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) ou la structure Est Atlantique (EA). En zone côtière, l'étude de Dupuis et al. (2006), basée sur des mesures à la bouée Biscarrosse (1980-1998), a montré une tendance à la baisse des hauteurs de vagues, et une faible corrélation de la NAO avec les hauteurs de vagues. Ces résultats différents soulignent le manque de données de vagues dans le Golfe de Gascogne à une résolution spatiale suffisamment fine et sur une période suffisamment longue pour permettre une analyse des tendances long-terme et de la variabilité interannuelle en zone côtière.

Cette étude a pour objectif de caractériser l'évolution spatiale et temporelle des vagues durant les dernières décennies dans le Golfe de Gascogne, en particulier en zone côtière, en lien avec les structures de téléconnection, et ce à partir de travaux de modélisation. Une première partie décrit le modèle mis en place et les données de vent utilisées pour modéliser les vagues dans le Golfe de Gascogne sur la période 1958-2001 avec une résolution spatiale adaptée à cette étude. Les résultats en termes de tendance pluri-décennale sont détaillés dans une seconde partie. Les résultats et l'analyse de la variabilité interannuelle sont ensuite présentés.

2. Modélisation des vagues

Un modèle de vagues emboîté a été mis en place avec le code WAVEWATCH III (Tolman 2009) et les paramétrages des termes source d'Ardhuin et al. (2010). Les vagues sont calculées sur deux domaines emboîtés (figure 1) : le premier couvre l'Atlantique Nord à une résolution spatiale de 0.5° pour capter l'ensemble des vagues susceptibles de se propager jusqu'à la côte aquitaine, et le second couvre le Golfe de Gascogne à une résolution spatiale de 0.1°. Les vagues sont générées par les champs de vent issus de la réanalyse ERA-40 du CEPMMT (résolution spatiale de 1,125°, toutes les 6 heures). La réanalyse ERA-40 sous-estimant les vitesses de vent au niveau de la bouée Gascogne, une correction du vent est appliquée, s'appuyant sur les mesures de vagues de 8 bouées de juillet-1998 à août-2002 (diamants pleins sur la figure 1, Charles et al. 2010). Le modèle mis en place fait l'objet d'une validation solide, basée sur 11 bouées côtières et océaniques (diamants sur la figure 1). Les statistiques obtenues pour les bouées situées sur la façade atlantique française (tableau 1) et à une profondeur de plus de 20 m sont satisfaisantes, avec un biais proche de 0 et un coefficient de détermination élevé ($R^2>0.87$) pour les hauteurs de vagues. Les champs de vagues obtenus sont d'une qualité suffisante pour procéder à une analyse de l'évolution du climat de vagues au cours des dernières décennies dans le Golfe de Gascogne.

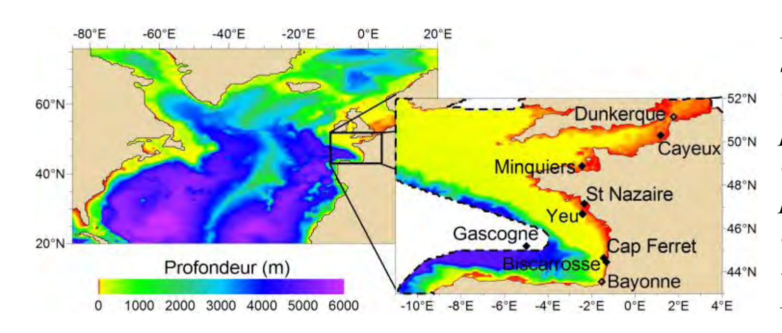


Figure 1 : Domaines utilisés pour les simulations. Les positions des bouées utilisées pour la validation sont indiquées par des diamants, et les bouées également utilisées pour la calibration par des diamants pleins. Le diamant Yeu représente 3 bouées (dont les bouées Yeu 2 et Yeu 3 utilisées pour la calibration). Minquiers et Yeu 2 sont directionnelles.

			Hauteur significative				Période moyenne T02				Direction pic	
	Période	Profondeur	Biais	RMSE	R²	SI	Biais	RMSE	R²	SI	Biais	RMSE
Bayonne	1989-1992	20 m	-10 cm	39 cm	0,87	23%	1,27 s	1,85 s	0,66	19%	-	-
Biscarrosse	1980-2000	26 m	10 cm	35 cm	0,87	24%	0,90 s	1,71 s	0,56	22%	-	-
Cap Ferret	2001-2002	54 m	0 cm	28 cm	0,92	15%	0,84 s	1,38 s	0,70	16%	-	-
Gascogne	1998-2002	4500 m	-1 cm	38 cm	0,94	15%	-0,17 s	0,77 s	0,82	10%	-	-
Yeu 1	1992-1998	47 m	-9 cm	32 cm	0,93	16%	0,62 s	1,24 s	0,71	17%	-	-
Yeu 2	1998-2000	32 m	-4 cm	28 cm	0,92	16%	0,69 s	1,14 s	0,70	15%	-3 °	24 °
Yeu 3	2000-2002	32 m	4 cm	30 cm	0,94	16%	0,80 s	1,35 s	0,71	17%	-	-

Tableau 1 : Comparaison des vagues simulées et mesurées : le biais, l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de détermination (R^2) et l'indice de dispersion (SI) sont calculés pour les hauteurs et les périodes, le biais et la RMSE pour les directions.

3. Tendances pluri-décennales

Les champs de vagues simulés sont examinés de manière systématique afin d'identifier les périodes, saisons et types de vagues présentant des changements significatifs (tendances différentes de 0 à une probabilité de plus de 95%, d'après le T-test de Student) dans la zone

d'intérêt. Il en ressort qu'il n'y a pas de tendance significative sur la période 1958-2001, quelle que soit le type de vagues (des vagues moyennes aux vagues dont la hauteur est supérieure au 95e percentile) ou la saison (figure 2). Cependant, sur la période 1970-2001, on note une augmentation significative des hauteurs de vagues en été dans le Golfe de Gascogne. Cette augmentation est localisée au large pour les vagues moyennes (+0.5 cm/an à la bouée Gascogne) et elle s'approche des côtes tout en s'intensifiant pour les vagues dont la hauteur est supérieure au 95e percentile (+2.6 cm/an à la bouée Gascogne et +1.3 cm/an à la bouée Biscarrosse).

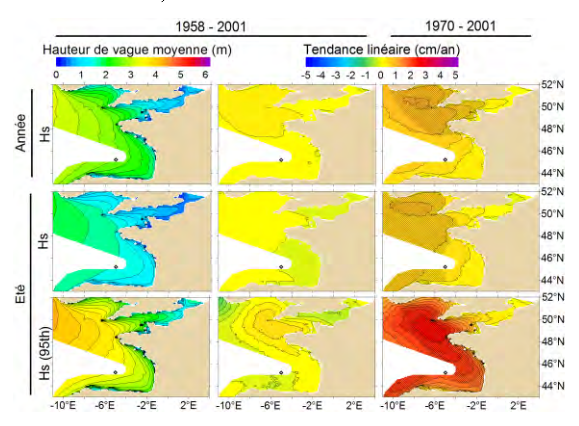


Figure 2 : Cartes des moyennes des hauteurs de vagues de 1958 à 2001 (1ère colonne) et des tendances de 1958 à 2001 (2e colonne) et de 1970 à 2001 (3e colonne) pour l'année complète (hauteurs des vagues moyennes) et pour l'été (hauteurs des vagues moyennes et hauteurs des vagues supérieures au 95e percentile). Les hachures indiquent des zones présentant des tendances significatives à plus de 95% (T-test).

4. Variabilité interannuelle

Les indices de structures de téléconnection donnent des indications sur la circulation atmosphérique à une grande échelle spatiale. De précédentes études ont permis d'établir un lien entre le climat de vague dans le Golfe de Gascogne et quelques-uns de ces indices (Dodet et al. 2010, Le Cozannet et al. 2010).

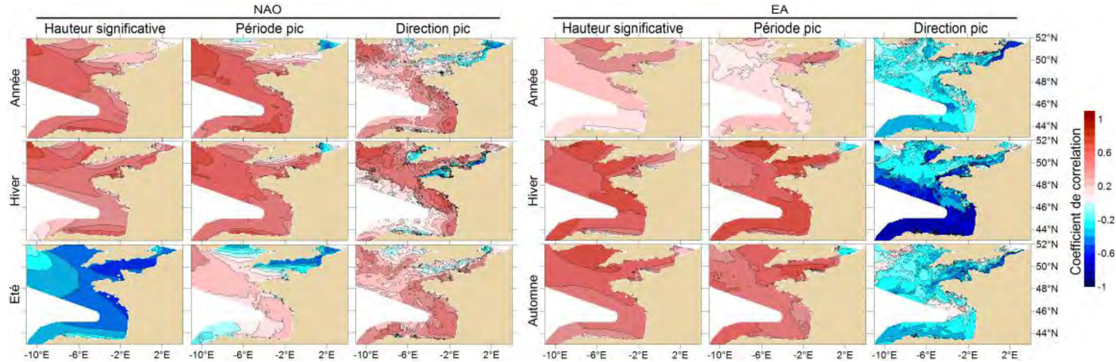


Figure 3 : Cartes de corrélation entre les indices de NAO, d'EA et les caractéristiques des vagues de 1958 à 2001 pour des saisons sélectionnées. Les hachures indiquent des zones avec des coefficients de corrélation significatifs à plus de 95% (T-test).

Dans la présente étude, les variations des anomalies annuelles de hauteur, période et direction sont comparées aux variations des indices des structures de téléconnection de l'hémisphère nord (Barnston et Livezey, 1987) pour différentes saisons. Les coefficients de corrélation obtenus (figure 3) sont particulièrement élevés pour la NAO et l'EA, ce qui rejoint les résultats de Le Cozannet et al. (2010). La phase positive de la NAO (NAO+) est associée à une augmentation des hauteurs et des périodes durant toute l'année et durant l'hiver, tandis qu'en été, la NAO+ est associée à une diminution des hauteurs de vagues. Pour toutes les saisons, la NAO+ est associée à un décalage vers le Nord de la provenance des vagues. En effet, les anomalies de pression associées à la NAO consistent en un dipôle Nord-Sud situé au-dessus de l'Atlantique Nord et qui génère des vents plus intenses et plus au Nord en NAO+. En été, les structures d'anomalies sont plus faibles et se décalent vers le Nord-Est, ce

qui pourrait expliquer la diminution des hauteurs. Quant à l'EA, les anomalies de pression associées en hiver et automne sont similaires à celles de la NAO mais avec un décalage du dipôle vers le Sud. L'action de l'EA sur le climat de vague dans le Golfe de Gascogne est donc similaire à celle de la NAO en hiver (intensification des fortes hauteurs de vagues), mais les directions des vagues sont cette fois-ci décalées vers le Sud.
Les champs de vagues simulés présentent également des corrélations modérées ($0.3<|R|<0.5$), voire fortes ($|R|>0.5$), avec d'autres indices de structures de téléconnection. Dans l'ensemble, les corrélations sont spatialement homogènes du large vers la côte. Bien que le climat de vagues dans le Golfe de Gascogne dépende aussi de paramètres locaux et non climatiques tels que la bathymétrie, la variabilité interannuelle des caractéristiques des vagues s'avère être fortement corrélée aux structures de téléconnection.

5. Conclusion

La résolution spatiale (10 km) et la longue période (1958-2001) des vagues modélisées ont permis de mettre en évidence différents points sur l'évolution spatiale et temporelle des vagues dans le Golfe de Gascogne : les seules tendances significatives concernent les vagues d'été de 1970 à 2001, avec une augmentation accrue pour les hauteurs de vagues extrêmes le long de la côte ; la variabilité interannuelle est fortement reliée aux structures de téléconnection de l'Atlantique Nord (NAO et EA) mais aussi à d'autres structures de téléconnection de l'hémisphère nord.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse BRGM-CNRM, AXA Research Fund, et co-encadrée par P. Delecluse et D. Idier. Les auteurs remercient l'équipe ERA-40, A. Braun (CNRM), A. Le Berre et X. Kergadallan (CETMEF), C. Deyts (CELM), R. Magne (SHOM), F. Dupros, F. Boulahya et N. Desramaut (BRGM) et la région Centre (CCSC) pour l'accès au calculateur PHOEBUS.

Bibliographie

Ardhuin F., Rogers E., Babanin A., Filipot J.F., Magne R., Roland A., Van Der Westhuysen A., Queffeulou P., Lefevre J.M., Aouf L., Collard F. : *Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation*, J. Phys. Oceanogr., 2010.

Bacon S., Carter D.J.T. : *Wave climate changes in the north Atlantic and North Sea*, Int. J. Climatol., 11, 545–558, 1991.

Barnston A.G., Livezey E.L. : *Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns*, Mon. Weather Rev., 115, 1083-1126, 1987.

Charles E., Idier D., Pedreros R., Le Cozannet G., Ardhuin F., Mallet C., Planton S : *Vagues sur la côte aquitaine : régionalisation dynamique de 1958 à 2002*, XIèmes journées nationales Génie Côtier – Génie Civil, 2010.

Dodet G., Bertin X., Taborda R. : *Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades*, Ocean Model., 31, 120-131, 2010.

Dupuis H., Michel D., Sottolichio A. : *Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades*, J. Marine Syst., 63, 105–114, 2006.

Le Cozannet G., Lecacheux S., Delvallee E., Desramaut N., Oliveros C., Pedreros R. : *Teleconnection pattern influence in the Bay of Biscay*, J. Climate, 2010.

Tolman H.L. : *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*, NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp + Appendices, 2009.

Impact du changement climatique sur les événements de tempête affectant les littoraux européens, le projet MICORE

Yann, Balouin[1], Oscar, Ferreira[2], Paolo, Ciavola[3] et le groupe MICORE
[1]BRGM, Service Géologique Régional du Languedoc-Roussillon, Montpellier, y.balouin@brgm.fr
[2]CIMA, Universidade do Algarve, Faro, Portugal, oferreir@ualg.pt
[3]Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara, Ferrara, Italy, cvp@unife.it

Abstract :
Within the European project MICORE (Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extreme storm events Project FP7 n° 202798), an analysis of historical storm events was performed. Physical characteristics of storms were studied to assess if the magnitude of storms, their duration and frequency has changed in the last decades. This contribution presents a critical analysis of the study, the main problems encountered and the results obtained on change in storminess at a European level.

Introduction

Les tempêtes entraînent souvent des réponses morphologiques rapides et importantes sur les littoraux sableux : érosion du trait de côte, submersion de la plage, franchissements dunaires, … Le projet européen MICORE (Morphological Impacts and Coastal Risk induced by Extreme storm events), qui associe 16 partenaires de 9 pays, a pour objectif principal de développer un démonstrateur d'outils intégrés pour la prévision des impacts morphologiques des tempêtes en soutien aux stratégies de protection civile. Des tempêtes importantes ont historiquement touché les littoraux européens mais la connaissance sur les modifications du régime de tempêtes reste limitée. Le changement climatique est supposé être le facteur principal d'une telle modification en induisant des changements d'intensité, de durée, de fréquence des événements extrêmes, une augmentation ou diminution des vents, des vagues ou de la surcote à long-terme. La compréhension des évolutions du régime de tempête lors des dernières décennies permettra aux gestionnaires du littoral de mieux se préparer aux événements futurs et de prendre en compte les tendances d'évolution des tempêtes dans leurs stratégies de mitigation et d'adaptation.

L'un des objectifs principaux de MICORE est d'entreprendre une analyse des évolutions des tempêtes et de considérer leur variabilité future dans un contexte de changement climatique. Cette analyse inclue l'étude des tendances dans les données météorologiques et vise à améliorer la compréhension de la réponse des littoraux à des évolutions potentielles des forçages. Elle est basée sur les jeux de données existants aux niveaux national et européen. Les forçages considérés comprennent les vagues de tempête, l'énergie, les vents et les niveaux de surcote, en fonction de la disponibilité et des conditions d'exposition spécifiques à chaque site. Le principal facteur limitant l'analyse est la disponibilité des données pour les 40 dernières années ou plus. Les mesures, comme par exemple la houle, sont disponibles depuis peu (2-3 décennies au maximum) et ne permettent pas seule l'analyse des tendances d'évolution. Il a donc été nécessaire d'incorporer des modèles de prévision pour étendre les séries disponibles.

L'objectif initial était l'analyse des données sur les 150 dernières années. Toutefois, seuls quelques pays ont des données qui permettent de remonter aussi loin, et leur qualité sont souvent telles qu'elles sont difficilement comparables avec les mesures ou modèles des 40 dernières années. Il a donc été décidé de focaliser l'analyse sur les dernières décennies où la donnée est disponible et de bonne qualité.

L'analyse a été réalisée pour toutes les zones d'études de MICORE auxquelles ont été ajoutées trois autres secteurs : l'Aquitaine, la Catalogne et la côte ouest du Portugal. Les sites analysés sont donc :

- Belgique : tout le littoral ;
- Bulgarie : tout le littoral ;
- France : Aquitaine et Golfe du Lion ;
- Italie : Nord de l'Adriatique ;
- Pays-bas : tout le littoral ;
- Pologne : tout le littoral ;
- Portugal : côtes sud et ouest ;
- Espagne : Andalousie et Catalogne ;
- Royaume-Uni : Est de la Mer d'Irlande.

Résultats

Les approches proposes par les différents partenaires de MICORE sont variables. Ceci est dû à la qualité très différente des données disponibles dans les différents pays, au choix des meilleurs proxies qui diffèrent selon les sites, et la période temporelle analysées. Malgré la volonté d'appliquer une approche similaire pour toutes les régions d'Europe, ceci s'est avéré impossible en raison de la forte hétérogénéité des données disponibles. Les résultats obtenus sont détaillés dans les sections suivantes.

Différences dans les jeux de données disponibles

Le problème majeur rencontré par les partenaires de MICORE a été la difficulté d'accéder à de longues séries de mesures. Pour plusieurs pays, les bases de données météorologiques ne sont pas publiquement accessibles ou sujettes à des restrictions d'utilisation, ce qui limite la distribution libre de la donnée. Dans plusieurs cas, les jeux de données n'excèdent pas quelques années, ou au mieux quelques décennies. Ce type d'information ne permet pas l'analyse des tendances à long terme qui sortiraient de la variabilité interannuelle ou de comportements cycliques.

La solution pour minimiser ce problème était d'étendre les bases de données existantes en intégrant les résultats de modèle de prévision (en particulier pour les vagues). Les deux différences majeures entres les données assemblées par les partenaires sont les sources de données (mesurées/modélisées) et la longueur des séries obtenues (de 4 à 105 ans).

Etant donnés les objectifs de l'étude, les séries inférieures à 30 ans n'ont pas été considérées. Même avec ce seuil, il reste difficile avec 3 décennies de s'affranchir de cycles long-terme (les cycles lunaires de 18 ans par exemple), et c'est la raison pour laquelle les conclusions de l'analyse doivent considérées avec précautions, en prenant en compte les limites des données existantes et disponibles. Dans quelques cas spécifiques, des résultats étaient d'ors et déjà disponibles dans la littérature (Belgique, Pologne) et une revue critique des ces informations a été établie.

Presque toutes les analyses de vents ont été basées sur des mesures, à l'exception de la Mer Noire où des simulations ont été utilisées. En revanche, les séries temporelles de houle excédant 30 ans sont toutes issues de modélisations. Seule la Belgique, la côte ouest du Portugal et la Catalogne disposaient de mesures.

Les périodes considérées pour l'analyse des vents sont comprises entre 46 ans (Pays-Bas) à 105 ans (Andalousie) ; pour la surcote de 45 ans (Pologne) à 100 ans (Pays-Bas) ; pour les vagues, de 30 ans (Belgique) à 60 ans (Bulgarie). Pour l'Italie, l'analyse de la houle n'a pu être réalisée que sur 18 ans.

Différences dans les indicateurs utilisés
Les régions côtières européennes sont soumises à différents régimes de tempêtes qui peuvent s'exprimer par des niveaux de surcote et/ou par des hauteurs de vagues. Les deux sont directement liés au forçage par le vent, bien que la surcote soit également dépendante de changements de pression atmosphérique et, à une échelle de temps différente, à l'augmentation du niveau de la mer.
Dans certaines régions d'Europe, les impacts des tempêtes sont principalement dus aux surcotes (Belgique, Pays-Bas, Pologne, Italie), dans d'autres régions, les vagues sont le facteur le plus important (Portugal, Espagne). En conséquence, l'utilisation d'un proxy commun à toutes les régions d'Europe n'est pas possible et chaque partenaire à défini ses indicateurs en fonction des données disponibles et des caractéristiques du secteur étudié.
Le vent a été utilisé comme proxy pour la Belgique, Bulgarie, Italie, Pays-Bas, Espagne et Royaume-Uni. Les surcotes ou niveaux d'eau ont été utilisés pour la Belgique, Italie, Pays-Bas, Pologne et Royaume-Uni. Les vagues ont été utilisées dans tous les pays à l'exception des Pays-Bas.

Différences dans les analyses
Tous les partenaires ont procédé à une évaluation de la qualité des données disponibles et défini le type d'analyse pour chaque jeu de données. Idéalement, les proxies analysés doivent couvrir l'évolution de la durée, de l'intensité et de la fréquence des tempêtes. Toutefois, il n'a pas été possible d'analyser la durée des tempêtes en Espagne et en Belgique, l'intensité en Espagne et la fréquence en Belgique. Pour toutes les autres régions côtières, toutes les tendances ont été analysées pour au moins un proxy. Afin de minimiser les erreurs, les interprétations portent sur les valeurs supérieures à un seuil de tempête donné et bien défini, et non sur les données moyennes. Un total de 54 proxies a été analysé pour les 12 régions côtières considérées.

Analyse des tempêtes
La première conclusion des concepts mentionnés ci-dessus est que l'intégration et la comparaison des informations au niveau européen est une tache difficile, en raison de la différence de jeux de données et des périodes étudiées.
La synthèse des analyses conduites par les partenaires de MICORE met en évidence la difficulté de définir une tendance claire de l'évolution du régime de tempêtes au niveau européen. Les résultats montrent une grande hétérogénéité des tendances d'évolution d'une région côtière à une autre. Le résultat dominant est l'absence de tendance, avec 62% des proxies analysés (36 sur 58) exprimant aucune évolution. Environ 19% (11 sur 58) des proxies montrent une augmentation des tempêtes, avec seulement 3 d'entre eux montrant une augmentation statistiquement significative ($p < 0.05$). Environ 19% (11 sur 58) des proxies montrent une diminution des tempêtes, non significative statistiquement.

Durée des tempêtes
L'analyse de la durée des tempêtes n'a pas été réalisée en Belgique et Andalousie. Il n'existe pas de tendance en France (Aquitaine et Méditerranée), Italie, Portugal, Côte ouest de l'Espagne et Mer d'Irlande. Une diminution, non significative, a été observée en Bulgarie et au Portugal, alors que la Pologne est la seule région d'Europe qui présente une augmentation de la durée des tempêtes (non significative).

Intensité des tempêtes
Il n'existe pas de tendance d'évolution de l'intensité des tempêtes en Belgique, Bulgarie, France (Méditerranée), Italie, Pays-Bas, Portugal (côte ouest), Espagne (Catalogne) et

Royaume-Uni. Une légère diminution est observée au sud du Portugal et en Belgique (hauteur de vagues supérieures à 3 m), mais reste peu significative. Une augmentation non-significative est observée en Belgique (niveaux de surcotes), Aquitaine et en Pologne. Il est intéressant de noter que dans certains pays (Belgique, Bulgarie), des proxies différents montrent des tendances opposées.

Fréquence des tempêtes
Cette évaluation n'a pas été réalisée en Belgique et en Espagne (Catalogne). Il n'y a pas de tendances observées en Italie (vagues et vents), Portugal (côte Ouest) et Royaume-Uni. Une diminution non significative est observée en Bulgarie, Pays-Bas, côte sud du Portugal et Espagne (Andalousie) (pour les vagues). Une augmentation de la fréquence des tempêtes est observée en France, Aquitaine et Méditerranée (de 1970 à 1990), Italie (surcotes), Pologne (augmentation significative pour les vagues et les surcotes) et Espagne (significative pour le vent). Six proxies sur 17 suggèrent une augmentation de la fréquence des tempêtes pour 5 régions côtières. Toutefois, 6 autres proxies montrent l'absence de tendance et 5 autres indiquent une diminution de fréquence pour 4 autres régions côtières. Pour l'une de ces régions (Espagne Andalousie), l'une des analyses (vents) indiquent une augmentation significative alors qu'une autre (vagues) indique une diminution, plus en cohérence avec la région voisine au Portugal.

Conclusions
L'utilisation de 58 analyse pour 12 régions côtières, en incluant des données mesurées et simulées et les indicateurs de tempêtes les plus importants (vagues, vents, surcotes) devraient permettre de données des valeurs indicatrices de l'évolution des tempêtes marines en Europe. Toutefois, les résultats obtenus dans cette étude, basés sur les données disponibles et les 12 régions analysées, démontrent qu'aucune tendance d'évolution générale sur les tempêtes ne peut être définie en Europe.
Pour quelques régions côtières, des tendances spécifiques peuvent être pointées :

- Bulgarie – En général, une décroissance des tempêtes est observée, bien que non significative ;
- France Aquitaine –, non significative, est observée;
- Pologne – En général, une croissance des tempêtes est observée, significative pour la fréquence des événements ;
- Portugal Côte Sud – En général, une décroissance, non significative, des tempêtes est observée.

Les résultats de cette étude pointent également la nécessité de rendre publics tous les jeux de données européens sur les indicateurs de tempêtes et la nécessité d'établir des réseaux de suivis des indicateurs de tempêtes qui devront être opérationnels sur plusieurs décennies, intégrant à la fois les données actuelles et historiques. Les trous dans les séries de mesures existantes doivent être comblés en utilisant les modèles numériques les plus avancés et les mieux calibres pour diminuer les incertitudes et améliorer la précision des analyses.
Actuellement, la variabilité interannuelle des tempêtes est plus importante que les évolutions à l'échelle de temps analysée (plus de 3 décennies). Quelques-unes des analyses (France - Aquitaine, Espagne - Andalousie) indiquent une relation claire entre les tempêtes et la NAO (Oscillation Nord Atlantique). Il n'a cependant pas été possible dans cette étude d'observer une association claire entre le régime des tempêtes et le changement climatique global. Ceci n'implique pas que les conséquences du changement global (augmentation de la température de l'eau, augmentation du niveau des mers) n'auront pas d'influence sur les régimes de tempête en Europe et sur les impacts des tempêtes. Cela signifie principalement que dans les

jeux de données existent et disponibles, ces impacts n'ont pas été détectés ou n'ont pas un signal visible et fort à l'échelle européenne.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet FP7 MICORE n°202798. Les auteurs français remercient la DREAL du Languedoc-Roussillon pour la mise à disposition de ses données hydrodynamiques.

Le projet CECILE : Changements Environnementaux Côtiers : Impact de l'Elévation du niveau de la mer

Gonéri Le Cozannet[1], Anny Cazenave[2], David Salas Y Mélia [3], Guy Wöppelmann[4], Vincent Donato [5], Patrice Walker[6], Philippe Rogel[7]

[1]BRGM, RNSC/RIC, 3 av. C. Guillemin, 45060 Orléans Cedex, g.lecozannet@brgm.fr
[2] Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS – UMR 5566)
[3] Centre National de la Recherche Scientifique / Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique (CNRM – URA-1357)
[4] Université de La Rochelle (Laboratoire LIttoral ENvironnement et SociétéS – UMR 6250)
[5] CREOCEAN
[6] Service hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)
[7] Centre Européen de Recherche et de Formation en Calcul Scientifique (Cerfacs)

Résumé :
Le projet CECILE a pour objectif l'étude de l'impact physique de l'élévation du niveau marin pour les 50 dernières années et le prochain siècle dans des régions côtières des départements et territoire d'outre-mer français dans leur contexte régional.
Il se concentre sur les aspects suivants :
(1) Observations : développement d'une méthodologie multidisciplinaire pour l'étude des variations du niveau marin récentes (50 dernières années) et actuelles et ses impacts physiques (changements dans la morphologie côtière) dans un certain nombre de zones côtières sélectionnées, dans le cadre d'une approche intégrée impliquant tous les facteurs liés au changement climatique, aux phénomènes naturels et aux forçages anthropiques.
(2) Attribution : analyse des contributions respectives des facteurs climatiques (élévation du niveau marin et sa variabilité régionale) et non climatiques (mouvements verticaux du sol, subsidences liées à des processus naturels ou anthropiques, érosion de la côte liée aux tempêtes, aux vagues et aux courants côtiers, et autres agents de forçages) sur les dernières décennies dans les régions sélectionnées.
(3) Modélisation des variations de niveau marin : amélioration de la modélisation climatique couplée sur les prochaines décennies afin d'estimer le rythme moyen d'élévation du niveau marin et sa variabilité régionale. Les observations par altimétrie satellitaire pour les 15 dernières années et les reconstructions pour les 50 dernières années seront utilisées comme contraintes en simulations rétrospective des modèles.
(4) Projection des niveaux marins : proposition de scenario fiables de changements du niveau marin d'origine climatique et relatif dans les zones sélectionnées (incluant les mouvements du sol).
(5) Impact côtier futur : étude de l'impact des zones sélectionnées selon leurs géomorphologies et selon différentes classes de scénarios climatiques, en se focalisant sur les pertes de terres côtières (érosion) potentielles.
Au-delà de la valorisation du projet par des communications scientifiques, le projet prévoit une valorisation auprès des parties prenantes à travers la constitution d'un groupe d'utilisateurs.

Introduction : Objectifs spécifiques du projet CECILE

L'objectif général du projet CECILE est l'étude de l'impact physique de l'élévation du niveau marin pour les 50 dernières années et le prochain siècle dans des régions côtières des départements et territoire d'outre-mer français, dans leur contexte régional. Les objectifs détaillés du projet (voir également Figure 1) sont les suivants :

- Améliorer la connaissance concernant l'élévation du niveau marin passée (50 dernières années) et future (jusqu'à 2100), en prenant en compte les mouvements relatifs du sol. Il s'agit de poursuivre les efforts de recherche communs entre sciences du climat et de l'océan (WP 2, 4) et géophysique (WP 2, 3) pour analyser toutes les composantes des variations du niveau marin passées et futures et fournir ainsi des informations aux scientifiques concernés par l'impact de l'élévation du niveau marin sur les côtes.
- Développer des méthodes pour analyser l'impact de l'élévation du niveau marin sur les mouvements du trait de côte. Les mouvements du trait de côte peuvent de fait avoir de nombreuses causes (vagues, courants, tempêtes, hausse du niveau marin) et l'attribution d'une évolution du trait de côte à tel ou tel facteur est délicate. Pour cela, une approche systémique sera mise en place dans le cadre du projet.

Multidisciplinarité du projet

L'élévation du niveau marin est un problème global qui a pour cause la variabilité et les changements de climat naturels et anthropiques (WP 2), mais qui intègre aussi la réponse dynamique de la terre solide à ces changements (WP 3). A l'échelle pluri-décennale, le plus préoccupant est l'impact potentiel sur les marges des calottes Antarctiques et du Groenland (WP 4), qui pourraient causer des élévations du niveau marin importantes. Des études récentes suggèrent également que ces redistributions de masses pourraient avoir des conséquences importantes sur la variabilité régionale des variations du niveau marin. Enfin, les conséquences de l'élévation du niveau marin sur les systèmes côtiers dépendent fortement de la géomorphologie côtière, mais ils doivent être analysés au sein de l'ensemble des phénomènes pouvant avoir un effet sur la morphodynamique littorale, notamment les événements extrêmes. Pour pouvoir cartographier les impacts potentiels (WP 5), il est nécessaire d'initier la constitution et la capitalisation d'une base de données d'observation de systèmes côtiers et de leurs évolutions sur le long terme (WP 1).

Resultats attendus

Ce projet procèdera à une revue des variations relatives du niveau marin et de sa variabilité régionale (observations et causes) et contribue à améliorer la modélisation des variations de niveau marin actuelles, passées (WP 2 et 3, LEGOS, LIENSS et SHOM) et futures (WP 4, CNRM et CERFACS) (moyennes globales et variabilité régionale). Il procèdera à des analyses permettant de mieux comprendre les impacts potentiels de l'élévation du niveau marin a des conséquences sur les milieux côtiers (WP 5). Cette démarche s'appuie sur l'expertise de CREOCEAN et du BRGM en termes d'exploitation de données historiques, en utilisant notamment des images aériennes anciennes archivées par le SHOM. Les évolutions observées doivent en outre être placées dans le contexte des facteurs d'état (géomorphologie, disponibilité en sédiments, influence de l'anthropisation sur les processus morphodynamiques côtiers) et des forçages (vagues, courants, tempêtes) qui gouvernent les mouvements du trait de côte.

Approche vis-à-vis des zones d'interret
Le niveau marin en France Métropolitaine a peu changé récemment. De plus, il est probable que dans les zones les plus vulnérables telles que le Delta du Rhône, l'élévation du niveau marin a joué – dans le passé récent - un rôle moins important que les réductions en apports de sédiments grossiers liées à l'anthropisation du bassin versant. Aussi, la démarche du projet est d'exploiter des données sur les systèmes côtiers dans des zones pour lesquelles le niveau marin a changé de manière importante au cours des 15 ou des 50 dernières années. C'est le cas de nombreux départements et territoires d'outre mer français, qui doivent être étudiés dans leur contexte régional. La capitalisation de ces observations permettra de mieux appuyer les cartographies d'impacts potentiels de l'élévation du niveau marin future.
Se focaliser sur un seul site rend difficile l'attribution des mouvements du trait de côte à telle ou telle cause, en raison de la complexité des processus en jeu et de leurs interactions (*Nicholls et al., 2007*). La nouveauté de l'approche proposée ici est de travailler sur une multiplicité de sites, d'une manière similaire à *Zhang et al., 2004* et *Webb et al. 2010*.

Conclusion : Organisation et partenaires du projet
Le projet a une durée de 3 ans (de 2010 à 2012) et fait partie du programme ANR/Changements Environnementaux planétaires. Il est mené par le consortium suivant :
- Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS – UMR 5566) – (coordination scientifique)
- BRGM (coordination du projet)
- Centre National de la Recherche Scientifique / Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique (CNRM – URA-1357)
- Université de La Rochelle (Laboratoire LIttoral ENvironnement et SociétéS – UMR 6250)
- CREOCEAN (Bureau d'études)
- Service hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)
- Centre Européen de Recherche et de Formation en Calcul Scientifique (Cerfacs)

Le projet comprend un workshop public final qui sera organisé fin 2012 et au cours duquel les résultats du projet seront présentés.

Remerciements
Cette étude est financée par l'Agence Nationale de la Recherche, dans le cadre de son programme « Changements Environnementaux Planétaires ».

Bibliographie

1. Webb A. P. and Kench P. S. (2010) : The dynamic response of reef islands to sea level rise : evidences from multi-decadal analysis of island change in the central pacific.
2. Nicholls, R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., McLean R.F., Ragoonaden S. and Woodroffe C.D. (2007) - Coastal systems and low-lying areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.
3. Zhang,K.Q., B.C.Douglas and S.P. Leatherman, 2004:Globalwarming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41-58.

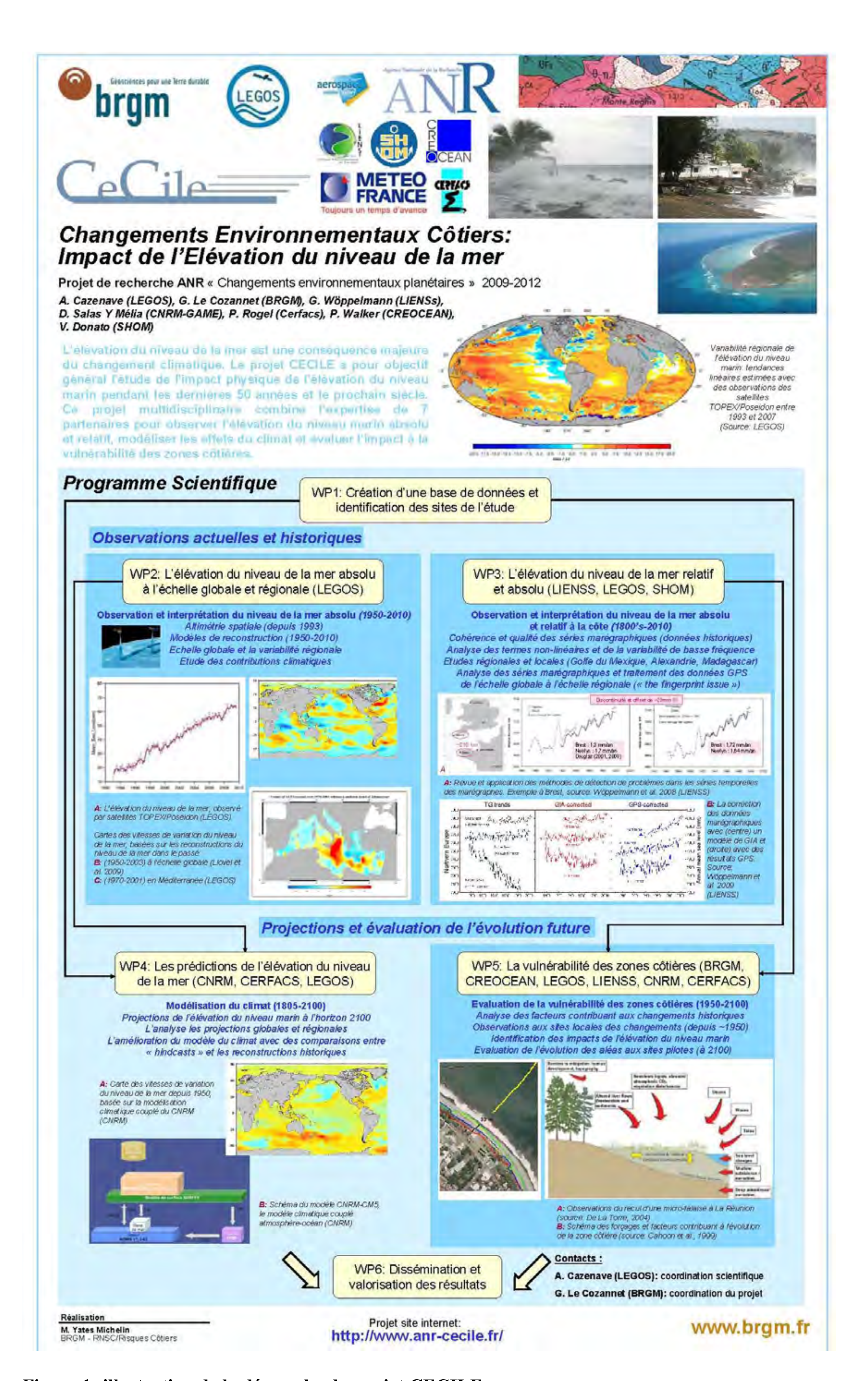


Figure 1: illustration de la démarche du projet CECILE

Hydrodynamisme d'une plage de baie mésotidale en conditions modales et en conditions de plus forte agitation (tempête Xynthia), Anse de Suscinio, Bretagne-Sud.

Dubois Alexandre, [1], alexandre.dubois@univ-ubs.fr
Sedrati, Mouncef[1], mouncef.sedrati@univ-ubs.fr
Menier, David, [1], david.menier@univ-ubs.fr

[1]Equipe Géosciences Marines & Géomorphologie du Littoral, EA 2219 Géoarchitecture Université de Bretagne-Sud, Campus de Tohannic, Centre de Recherche Yves Coppens BP 573, 56017 Vannes cedex, France.

Abstract :
Deux déploiements de deux courantomètres-houlographes et d'un courantomètre ont eu lieu dans la plage de baie mésotidale de l'anse de Suscinio. Le premier déploiement a eu lieu du 28 janvier au 5 février 2010 pendant des conditions modales. Le second déploiement a eu lieu du 26 février au 5 mars 2010 comprenant le passage de la tempête Xynthia. Les trois appareils (deux ADCP et un S4 *ADW*) ont été placés sensiblement aux mêmes endroits de l'estran mais à des profondeur variables; un ADCP-houlographe à l'ouest, un S4 *ADW* au centre et un ADCP à l'est, proche d'un platier rocheux affleurant. Les trois appareils ont principalement enregistré les paramètres de courants et de houles dans la zone de shoaling. Lors des conditions modales, les appareils mettent en évidence des courants bidirectionnels de composante longitudinale prépondérante sur les courants de composante transversale et avec des vitesses faibles de l'ordre de 0,10 m/s à l'ouest comme au centre de la baie. Cependant, à l'est, on observe des courants aux directions aléatoires qui reflètent la mise en place d'un courant de gyre avec un certain retard dû à l'amortissement de la propagation de l'onde de marée par le platier rocheux. Lors de conditions agitées, on observe un forçage du vent sur les courants tidaux empêchant ainsi l'installation du flot et/ou du jusant dans le sens d'écoulement modal. A l'est, les courants sont, comme lors de conditions modales, aléatoires montrant la forte dominance du courant de gyre. La tempête Xynthia a fortement érodé le centre de la baie et a mis à nu un platier rocheux. Des courants aléatoires ont donc été mesurés sur ce point. L'analyse spectrale des houles indique une nette dominance des ondes gravitaires. Une plus forte présence des ondes infragravitaires est observée en zone de surf lors des conditions de forte agitation.

Introduction

Le littoral atlantique français a fait l'objet de plusieurs campagnes de mesures hydrodynamiques *in situ*. C'est le cas en aquitaine (Sénéchal, 2009), en mer d'Iroise (Dehouck, 2009) en Normandie (Levoy, 2000) et Nord-Pas-de-Calais (Anthony, 2004). Ces mesures ont pour objet de déterminer les intensités et les directions des courants marins ainsi que les paramètres des houles responsables des différentes morphologies observées sur les plages sableuses. Pourtant, l'activité hydrodynamique du littoral Sud Breton ainsi que ces réponses morphodynamiques restent très faiblement connues. En effet, aucune mesure hydrodynamique n'a encore été effectuée sur le littoral Sud Breton. Cette étude présente les principaux résultats des conditions hydrodynamiques d'une plage de baie de Bretagne Sud. L'anse de Suscinio, située en presqu'île de Rhuys (Morbihan), est une plage réflective en morphologie de « Low Tide Terrasse » (Masselink et Short, 1993) ayant fait l'objet de deux déploiements de trois courantomètres-houlographes (figure 1). Ces déploiements ont permis de mesurer les directions et les intensités des courants ainsi que les paramètres de houle

pendant des conditions modales et des conditions de plus fortes agitations, au passage de la tempête *Xynthia* du 28 février 2010.

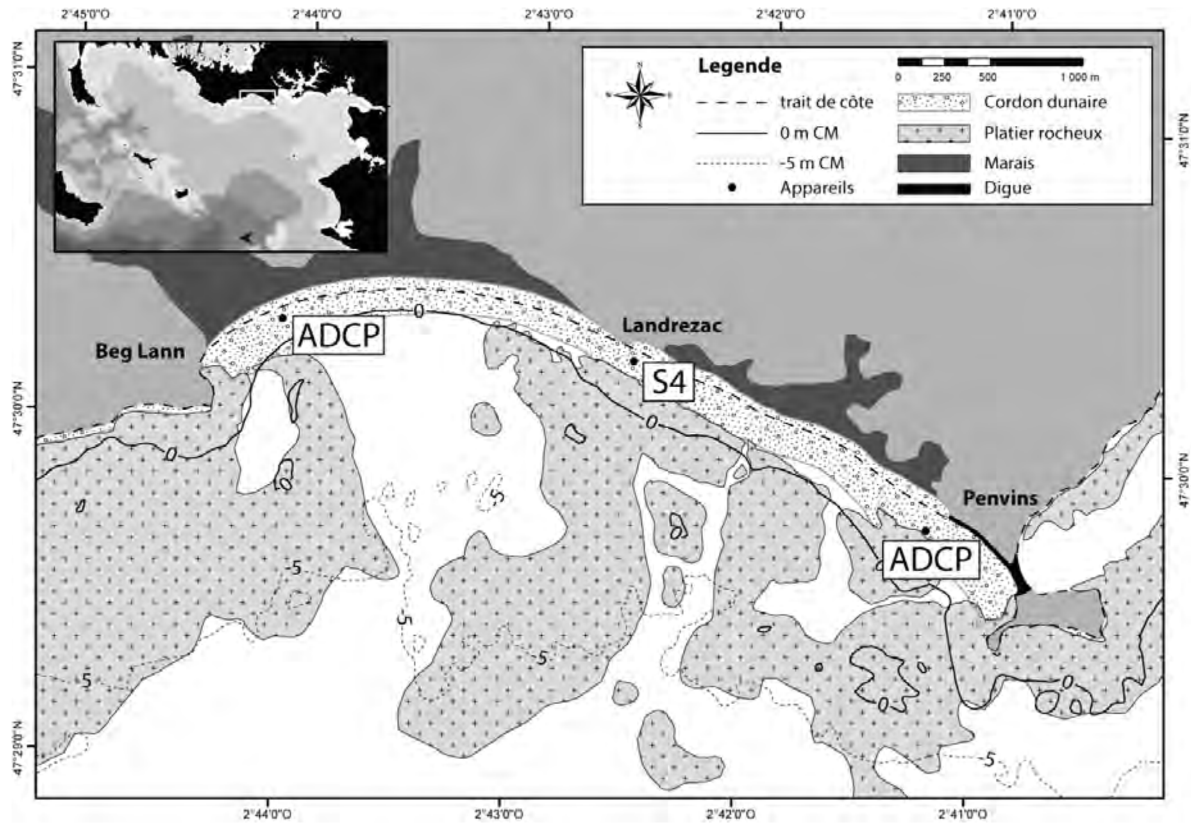


Figure 1 : Localisation de l'anse de Suscinio. Les trois courantomètres ont été déployés à l'ouest (Beg Lann), au centre (Landrezac) et à l'est (Penvins) sur le domaine dissipatif de l'estran. A Penvins, l'ADCP est placé à proximité d'un platier rocheux affleurant.

Méthodologie

Le premier déploiement d'appareil a eu lieu du 28 janvier 2010 au 5 février 2010, en conditions de faible agitation. Le second a eu lieu du 26 février au 5 mars 2010, en condition de plus forte agitation. Deux ADCP *sentinel* 1200 Hz et un S4*Adw* ont été utilisés. Seul un des deux ADCP était équipé d'un capteur de pression, capable de mesurer les paramètres de houle. Celui-ci a été déployé à l'ouest de la baie. Le second ADCP a été déployé à l'est. Le S4 a quant à lui été disposé au centre de la baie.

Les trois appareils ont été programmés de la même façon. La durée d'enregistrement (*burst*) a été de 9 minutes toutes les 15 minutes à une fréquence de 2 Hz. Les données brutes recueillies ont été traitées avec les logiciels WinADCP, WaveView, S4App 3.0.32 et WaveWin et exportées au format ASCII.

Résultats

Les trois sites étudiés de l'anse de Suscinio présentent des résultats sensiblement différents pour des conditions de forçages météo-marins identiques. Les directions d'écoulement des courants mesurés peuvent être très variables. Pourtant, les vitesses de ces courants sont comparables et sont le plus souvent de l'ordre de 0,1 m/s. On remarque cependant, pour des conditions d'agitations variables, une intensité plus importante du flot par rapport au jusant.

- **Conditions modales (Hs=0,2-0,25 m et vitesse du vent=1-2 m/s)**

L'enregistrement du 31 janvier 2010 (figure 2) montre des conditions de très faible agitation et de forçage météo-marin. L'ADCP situé à Beg Lann montre un flot stable s'installant N250 et un jusant moyen N135. Le courant tend à y être bidirectionnel. A Landrezac, le courant est clairement bidirectionnel. On observe, lors des plus importantes hauteurs d'eau une inversion des directions des courants séparant le flot du jusant. La composante longitudinale du courant est supérieure à la composante transversale. A Penvins, l'ADCP enregistre un courant unidirectionnel de direction moyenne N220. Aucune renverse de courant n'est observée.

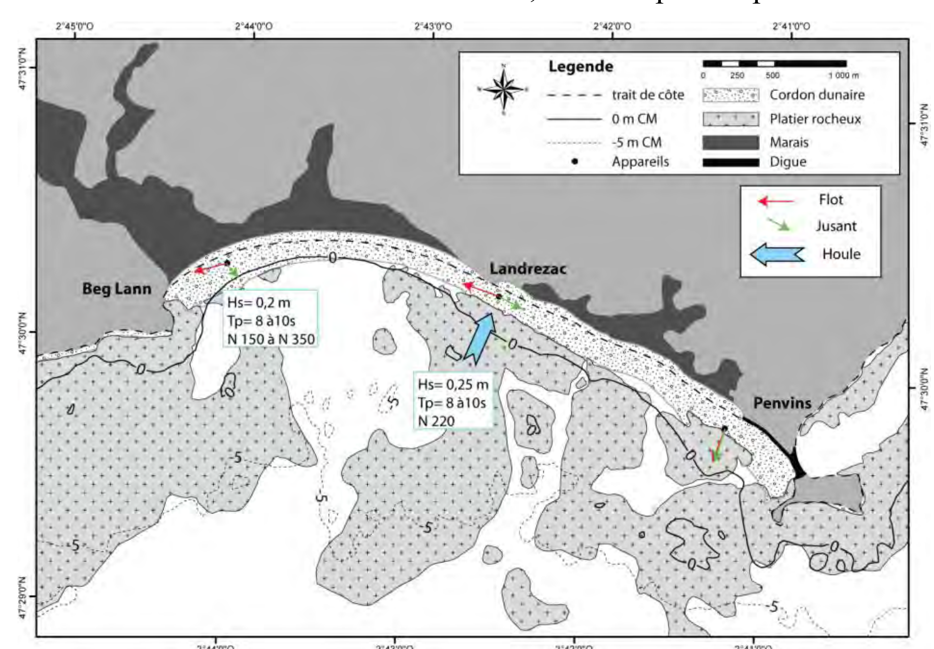


Figure 2 : Représentation schématique des résultats hydrodynamiques obtenus lors de conditions modales dans l'anse de Suscinio. Enregistrement du 31 janvier 2010.

- **Conditions de forçage moyen (Hs=0,25-0,3m et vitesse du vent=9 m/s orienté N90)**

L'enregistrement du 3 mars 2010 (figure 3) montre une agitation modérée et un forçage plus important. Pendant toute la durée de la pleine mer, le vent est orienté N90 avec une intensité relativement constante de 9 m/s. On observe plusieurs changements de direction d'écoulement des courants, notamment à l'ouest et à l'est. A Beg Lann, le jusant s'installe plus difficilement. Les courants tendent à devenir unidirectionnels. Le centre de la baie ne subit pas d'imposant changement. En revanche, à l'est, les courants s'écoulent dans une direction quasi opposée à celle observée lors de conditions modales.

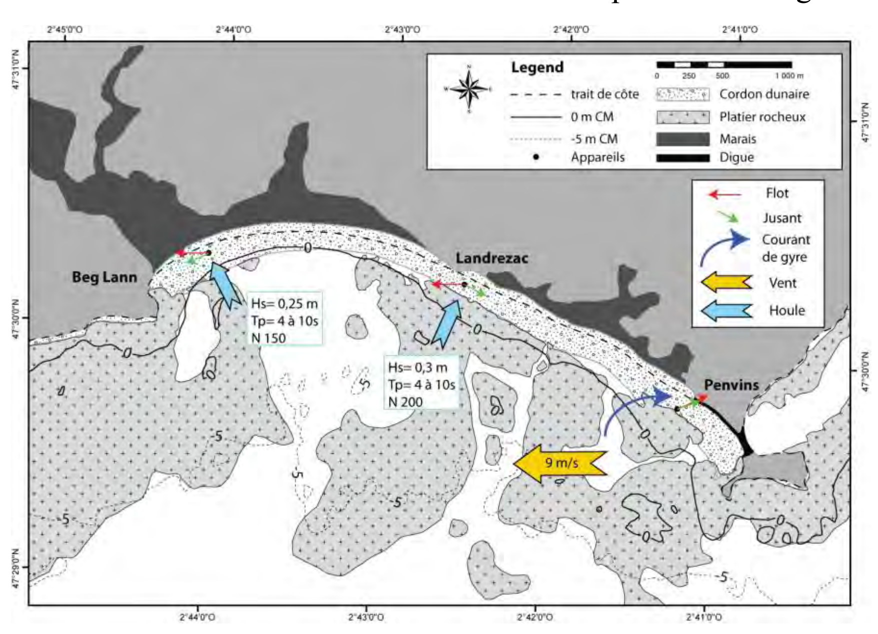
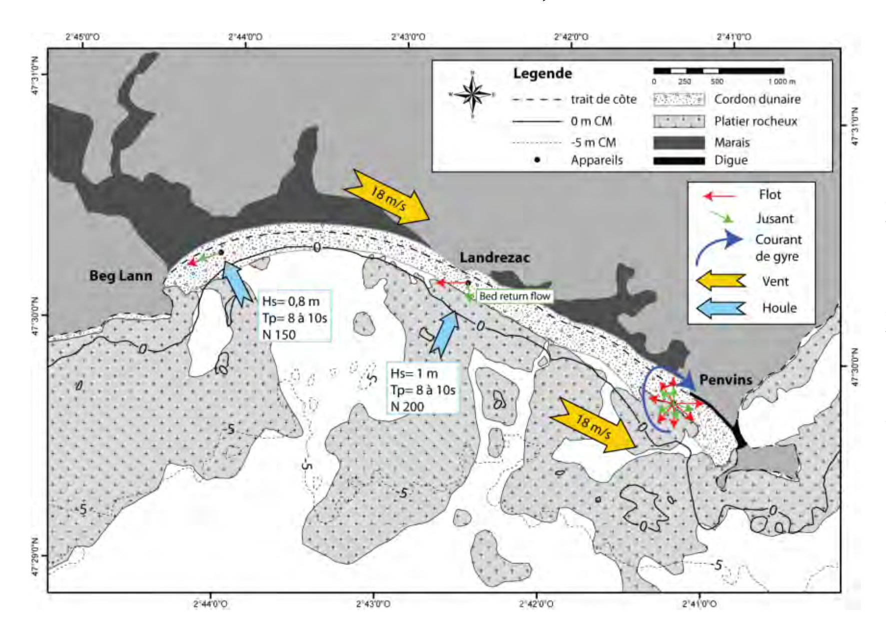


Figure 3 : Représentation schématique des résultats

hydrodynamiques obtenus lors de conditions de forçage moyen dans l'anse de Suscinio. Enregistrement du 3 mars 2010.

- **Conditions de forte agitation, passage de la tempête *Xynthia* (Hs=0,8-1m et vitesse du vent=18 m/s orienté N320)**



Lors de la tempête *Xynthia*, les courants tidaux ont enregistrés une légère augmentation d'intensité pour atteindre 0,2 m/s pour certains *burst*. Les directions d'écoulements sont forcées par ces conditions de forte agitation (figure 4). A l'ouest, le courant est unidirectionnel, au centre le courant de jusant s'installe en courant transversal orienté vers le large. A l'est, la direction du courant est aléatoire.

Figure 4 : Représentation schématique des résultats hydrodynamiques obtenus lors de conditions de la tempête Xynthia dans l'anse de Suscinio. Enregistrement du 28 février 2010.

- **Analyses spectrales**

Les analyses spectrales des *burst* enregistrés lors de conditions modales et de tempêtes montrent des spectres similaires avec la présence d'ondes infragravitaires à marée montante lorsque l'appareil est soumis au déferlement. Les ondes infragravitaires disparaissent lors des pleines mers de forte agitation. Les périodes au pic à marées hautes sont supérieures à celles mesurées à marées montantes. Toutefois, lors des conditions de tempête, les énergies des houles gravitaires sont près de vingt fois supérieures à celle enregistrées lors de conditions modales.

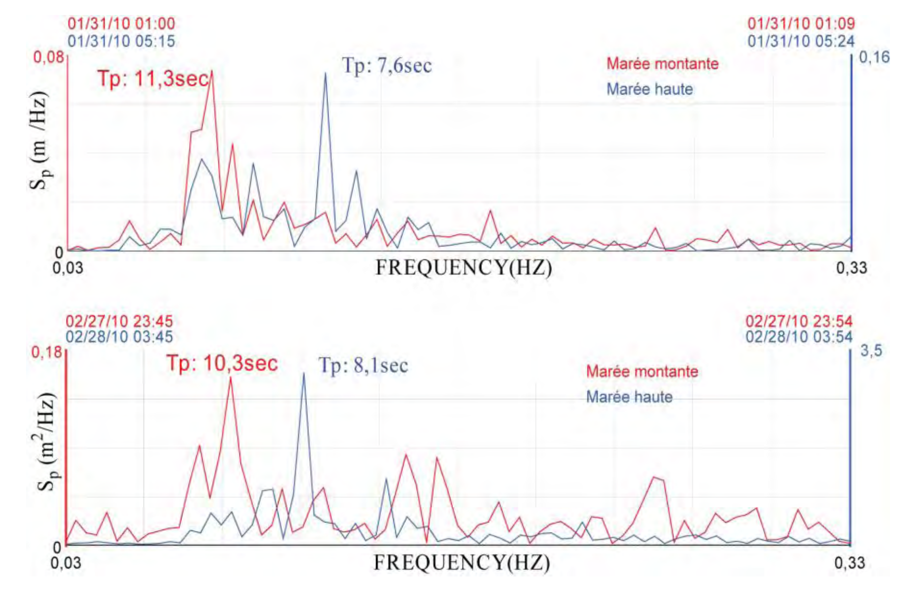


Figure 5 : Analyses spectrales à marées montantes et lors des pleines mers en conditions modales (en haut) et lors des conditions du passage de la tempête Xynthia (en bas).

Conclusion

La baie de Suscinio est une plage mésotidale dominée par les courants de marée. Le flot y est globalement orienté vers le nord-ouest et le jusant vers le sud-est avec une prédominance du flot. Dans cette baie, les intensités des courants tidaux sont de l'ordre de 0,1 m/s pour des conditions modales jusqu'à 0,2 m/s pour des conditions de tempête. De part et d'autre de la baie, les directions d'écoulement des courants sont variables. En conditions modales (Hs=0,2-0,25 m, vitesse du vent = 1-2 m/s), à l'ouest et au centre, les courants sont bidirectionnels. Les directions des courants s'inversent en passant du flot vers le jusant, suivant la propagation de l'onde de marée. Pourtant, à l'ouest le platier rocheux semble installer un courant de gyre unidirectionnel qui force les courants tidaux à emprunter une direction préférentielle N 220. En condition de forçage moyen (Hs = 0,25-0,3 m et vitesse du vent = 9 m/s orienté N 90), le jusant s'installe plus difficilement, à l'ouest, le courant tend à devenir unidirectionnel orienté vers l'ouest. Le centre de la baie est moins affecté. A l'est, à proximité du plateau rocheux, le courant de gyre force les courants à s'écouler vers la direction N 70. Lors des conditions de la tempête *Xynthia* (Hs = 0,8-1 m, vitesse du vent = 17 m/s orienté N 320), à l'ouest le courant est clairement unidirectionnel. Le jusant ne peut s'installer. Au centre, le jusant est de composante transversale orientée vers le large en « bed return flow ». A l'ouest, la direction aléatoire des courants indique une forte dominance du courant de gyre. Avec l'affleurement du platier rocheux, à l'est, les directions d'écoulements des courants sont fortement influencées par la morphologie du littoral. L'analyse spectrale des houles indique une nette dominance des ondes gravitaires. A marée montante, les ondes infragravitaires sont très présentes en condition de déferlements lors des conditions de tempêtes. Elles disparaissent ensuite lors de la pleine mer. Les données hydrodynamiques, seules, ne permettent pas d'expliquer l'impact de la tempête *Xynthia* sur le cordon dunaire de Suscinio. Les paramètres morphologiques et granulométriques y jouent un rôle très important.

Références

E. J. Anthony, F. Levoy, O. Monfort Morphodynamics of intertidal bars on a megatidal beach, Merlimont, Northern France *Marine Geology*, *Volume 208, Issue 1*, *30 July 2004*, *Pages 73-100*

A. Dehouck, H. Dupuis, N. Sénéchal Pocket beach hydrodynamics: The example of four macrotidal beaches, Brittany, France *Marine Geology*, *Volume 266, Issues 1-4*, *15 October 2009*, *Pages 1-17*

F. Levoy, E. J. Anthony, O. Monfort, C. Larsonneur The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France , *Marine Geology*, *Volume 171, Issues 1-4*, *15 December 2000*, *Pages 39-59*

Masselink, Short A.D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research, Volume 9, Issues 3, 1993 pages 785–800*

N. Sénéchal, T. Gouriou, B. Castelle, J.-P. Parisot, S. Capo, S. Bujan, H. Howa Morphodynamic response of a meso- to macro-tidal intermediate beach based on a long-term data set *Geomorphology*, *Volume 107, Issues 3-4*, *15 June 2009*, *Pages 263-274*

THEME 2 :

Impacts sur les aléas

VULNERABILITE DE SYSTEMES COTIERS SABLEUX FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET AUX PRESSIONS ANTHROPIQUES : METHODES, OUTILS, RESULTATS ET ENSEIGNEMENTS

Déborah Idier[1], Yann Balouin[1], Raquel Bohn Bertoldo[12], Frédéric Bouchette[2], Faiza Boulahya[1], Olivier Brivois[1], Daniel Calvete[3], Sylvain Capo[4], Bruno Castelle[4], Raphael Certain[5], Elodie Charles[1], Eric Chateauminois[6], Etienne Delvallée[1], Albert Falquès[3], Paul Fattal[7], Philippe Larroudé[8], Sophie Lecacheux[1], Roland Garnier[9], Arnaud Héquette[10], Gonéri Le Cozannet[1], Mohamed Maanan[7], Cyril Mallet[1], Aurélie Maspataud[10], Claire Mays[12], Carlos Oliveros[1], Martin Paillart[11], Jean-Paul Parisot[4], Rodrigo Pedreros[1], Marc Poumadère[12], Nicolas Robin[5], Marie-Hélène Ruz[10], Marc Robin[7], Jérôme Thiébot[1], Charlotte Vinchon[1]

[1]BRGM, 3, av. C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, d.idier@brgm.fr
[2] GEOSCIENCES, Cc 60 Univ. Montpellier II cedex 5, 34095 Montpellier
[3] UPC, C/ Jordi Girona 1-3, Modul B4/B5, despatx 103 - E-08034, Barcelona, Spain.
[4] EPOC, avenue des Facultés, domaine Universitaire Bordeaux 1, 33405 Talence
[5] IMAGES, Univ. Perpignan, 52 av. P. Alduy, 66860 Perpignan
[6] BRLi, 1105, avenue Pierre Mendès France BP 4001, 30001 Nîmes cedex
[7] LETG, UMR CNRS 6554, Pôle Mer et Littoral, Univ. de Nantes, BP 81227, 44312 Nantes
[8] LEGI, BP 53, 38041 Grenoble, Cedex 9
[9] E.T.S.I. de Caminos, Univ.de Cantabria, Avda. de los Castros s/n, 39005 Santander, Spain.
[10] LOG, Univ. du Littoral Côte d'Opale, MREI 2, 189A Av. M. Schumann, 59140 Dunkerque
[11] C.C. de l'île de Noirmoutier, BP 714, rue de la Prée au Duc, 85330 Noirmoutier-en-l'Ile.
[12] SYMLOG, 262 rue St Jacques, 75005 Paris

Abstract:
Within the ANR VULSACO project (VULnerability of SAndy COast to climate change and anthropic pressure), the present day erosion tendencies as well as the potential future erosion trends are investigated. The main objectives are to: (1) assess indicators of vulnerability to climate change for low-lying linear sandy coastal systems, facing undergoing climate change and anthropic pressure until the 2030s; and (2) identify the aggravating or reducing effect of human pressure on this vulnerability. This paper presents the methodology and a focus on some results. The lessons learned from that project are also pointed out.

1-Introduction

La dynamique de la zone littorale est directement dépendante des vagues et courants en zone côtière. Ces facteurs hydrodynamiques sont, quant à eux, directement liés à la dynamique du système océan-atmosphère, et donc à l'évolution du climat, aussi bien en termes de variabilité climatique que de changements climatiques. Ainsi, les systèmes côtiers devraient être fortement vulnérables aux changements climatiques. C'est dans ce contexte qu'a été réalisé le projet ANR VULSACO, portant sur la vulnérabilité des plages sableuses face aux changements climatiques et pressions anthropiques. Dans ce projet, d'une part il s'agissait d'identifier et estimer des indicateurs de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion marine pour les côtes sableuses basses, de l'avant-plage à l'arrière pays, face au changement climatique à échéance des années 2030. D'autre part, le rôle aggravant ou modérateur que peut avoir le facteur d'occupation humaine du littoral sur cette vulnérabilité a été étudié. Les échelles temporelles vont du court-terme (échelle des tempêtes) au moyen-terme (décennies).

Le projet est basé sur l'étude de quatre plages sableuses métropolitaines, à savoir les plages du lido de Sète (34), du Truc Vert (33), de La Tresson (85), et de Dewulf (59). Ces sites sont caractérisés par des environnements hydrodynamiques et socio-économiques représentatifs des plages sableuses basses métropolitaines. Cette communication vise à présenter la méthode mise en place, les outils utilisés, quelques résultats marquants, ainsi que les principaux enseignements tirés à l'issue de ce projet.

2-Méthode

Afin d'avoir une approche la plus similaire possible entre les sites, la méthode a été la suivante (figure 1). Tout d'abord une caractérisation macroscopique physique, environnementale et socio-économique des quatre sites a été effectuée (Vinchon et al, 2008). Ensuite, pour chacun des sites, une analyse des données passées (trait de côte, profil de plage, conditions de vagues au large, …) a été réalisée pour identifier l'existence ou non de corrélations entre la dynamique des plages et le climat, aussi bien en termes de changements que de variabilités climatiques. Une fois le comportement passé analysé, il s'agissait d'estimer la vulnérabilité des sites par rapport aux changements climatiques possibles. Pour cela, deux approches complémentaires ont été suivies.

Une première approche est basée sur la modélisation numérique morphodynamique des plages. Tout d'abord, le climat actuel a été caractérisé pour chaque site, avec un certain nombre de scénarios de conditions de vagues, marée, surcotes. Des modèles morphodynamiques ont été mis en place afin d'étudier le comportement du système pour ce climat actuel. Ensuite, des scenarios « futurs » ont été construits sur la base de variations de +/-10% des hauteurs de vagues par exemple. Les modèles ont alors été utilisés pour étudier les changements de comportement de la plage pour ces scénarios. Plusieurs centaines de simulations ont été effectuées, puis traduites en termes d'indicateurs pour faciliter l'analyse.

La deuxième approche a consisté à analyser les prises de décision par les parties prenantes, en s'appuyant sur des questionnaires, des interviews et des ateliers de mise en situation.

Enfin, sur la base de la caractérisation des sites, des analyses de données passées, de la connaissance de chaque site et des résultats de modélisation, une revue des indicateurs existants a été faite dans la perspective d'une application sur les quatre sites d'étude pour estimer leur vulnérabilité évènementielle et long-terme. Ces éléments sont utilisés pour proposer de nouveaux indicateurs.

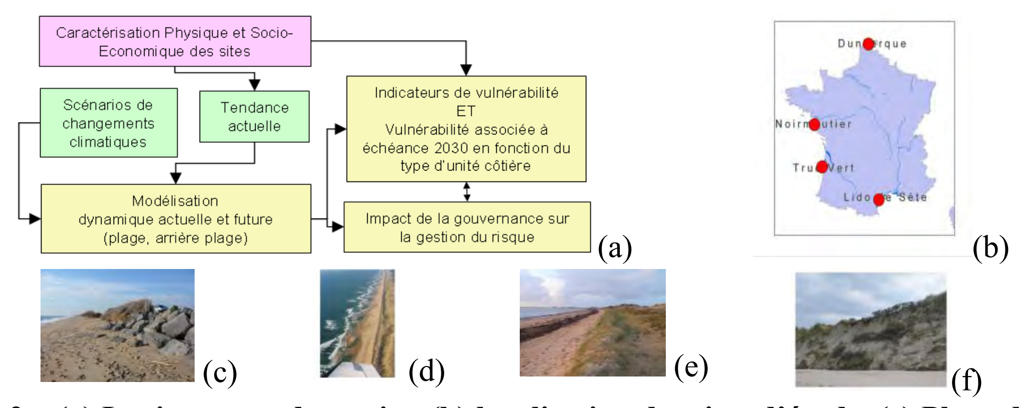


Figure 2 – (a) Logigramme du projet. (b) localisation des sites d'étude. (c) Plage du Lido de Sète, (d) Plage du Truc Vert, (e) Plage de La Tresson, (f) Dunes Dewulf.

3-Quelques résultats marquants

3.1- Evolutions passées et climat

De 1997 à 2007, un suivi topographique régulier de la plage du Truc Vert est réalisé, avec des profils cross-shore (longueur ~250 m) du pied de la dune embryonnaire à la laisse de basse-

mer. En outre, en utilisant la technique d'analyse factorielle (AFC) et une analyse fréquentielle pour déterminer la périodicité des variations morphologiques et hydrodynamiques et établir des corrélations entre les forçages (houle, marée), Parisot et al (2010) ont montré une cyclicité de la plage de 2/3 ans et une corrélation entre la dynamique de la plage et le forçage lié à la houle et l'indice NAO (Oscillation Nord Atlantique). Ce résultat est consistant avec les corrélations mises en évidence par Le Cozannet et al (2010) entre les climats de vagues dans le Golfe de Gascogne et la NAO entre autres.

3.2- Modélisation

La modélisation effectuée dans Vulsaco n'était pas au départ foncièrement nouvelle, partant de modèles commerciaux (Telemac, Genesis) ou de recherche (Marsouin, X-Beach, morphodyn, morfo60, morfo55, 1D-morfo) existants. Cependant, l'application de ces modèles à des environnements variés (4 sites) a permis d'identifier de nouveaux phénomènes. Par exemple, Idier et al (2009) ont mis en évidence l'existence d'instabilités du trait de côte pour des vagues d'incidence normale à quasi-normale à la côte, alors que ces instabilités n'étaient connues que pour des vagues de forte incidence (Ashton and Murray, 2006). De même, Thiébot et al (2009) ont mis en évidence les différents comportements possibles de systèmes à double barre (e.g. site du Truc Vert) en fonction de l'incidence des vagues. Ces modélisations ont permis de mieux comprendre l'évolution possible du système en fonction des évolutions des conditions de vagues. De plus, le nombre de simulations morpodynamiques effectué (100 scénarios par sites, plusieurs modèles mis en œuvre) a permis, malgré les limites des modèles, non seulement de mieux comprendre le comportement des plages, mais aussi d'initier des traitements adaptés pour l'analyse de jeux de simulations importants.

3.3- Gouvernance

Afin d'appréhender le type de décision (ainsi que les mécanismes associés) que les parties prenantes pourraient prendre en 2030, des ateliers de mise en situation ont été effectués (Poumadère et al., 2010). Ainsi, pour trois des quatre sites, ces ateliers ont eu lieu au 1er semestre 2010. Le caractère interdisciplinaire et complet de la situation de recherche proposée lors des ateliers avec les parties prenantes, a fortement contribué à l'implication de ces dernières. Ces ateliers ont été un élément de sensibilisation des parties prenantes au processus et à l'anticipation des prises de décisions, basées sur des résultats scientifiques, portant à des échéances lointaines (2030). Ces prises de décisions sont étroitement liées à ce qui est acceptable ou pas par la société. En particulier, la notion de seuil de risque que la société peut tolérer nous semble être un point d'entrée intéressant pour développer de nouvelles approches d'étude du risque en général et côtier en particulier (Idier et al, 2010).

3.4- Indicateurs

L'analyse bibliographique des indicateurs de vulnérabilité physique existants a permis d'identifier les facteurs importants à prendre en compte. Sur cette base, des indicateurs ont été appliqués, dont celui de Coehlo et al (2006) pour l'échelle long-terme. Si les résultats donnent globalement la hiérarchisation attendue entre les vulnérabilités des sites sur les échelles long-terme et événementielles, les limites de ces indicateurs pour une application comparative spécifique sur des plages sableuses dont les géomorphologies sont proches sont également ressorties. Aussi, afin d'affiner ces indicateurs, les experts des sites ont identifié d'autres paramètres importants pour chaque site. Un indicateur long-terme, défini à partir de celui de Coehlo (2006), a ainsi été proposé. Certains paramètres existants ont été étoffés (géologie, géomorphologie et action anthropique) et d'autres ont été rajoutés (disponible sédimentaire, direction des vagues, …). Il s'agit maintenant d'appliquer ce travail à de nombreux autres

sites afin de tester la robustesse des développements. Enfin, la vulnérabilité socio-économique a aussi été intégrée dans des indicateurs (Fattal et al., 2010).

4-Enseignements et conclusion

Le projet VULSACO visait à intégrer l'influence du changement climatique et le rôle de la gouvernance dans l'étude de la vulnérabilité de plages sableuses, à échéance 2030, par analyses de données et modélisation. Une telle échéance, qui était au départ un compromis entre échelles de temps des parties prenantes et échelles de temps physique de changement climatique, correspond plus à une échelle propre à la variabilité climatique. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les résultats obtenus. Pour la suite, les travaux de modélisation réalisés ont mis en évidence la nécessité de poursuivre les travaux de recherche en modélisation morphodynamique côtière, aux échelles de temps aussi bien événementielles que décennales. Enfin, en 2007 (début du projet), il n'existait aucune données (sorties de modèles) de vagues pour les périodes futures en zone littorale. Cette difficulté nous a incités à recourir à des scénarios. Si ce projet démarrait aujourd'hui, les choix seraient différents étant donné l'émergence de modélisations des vagues en zone côtière couvrant des périodes futures (Grabemann and Weisse, 2008).

Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme VMC (projet VULSACO, n° ANR VMC06-009). Les parties prenantes ayant contribué à ce projet sont aussi vivement remerciées.

Références

Ashton, A., and A. Murray (2006) High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 2. wave climate analysis and comparisons to nature, J. Geophys. Res., 111, 481 F04,012,doi:10.1029/2005JF000,423.

Coelho C., Silva R., Veloso-Gomes F., Taveira-Pinto F. A vulnerability analysis approach for the Portuguese west coast. In: Popov V., Brebbia C. A., editors. Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation. Vol. 91. UK: Wessex Institute of Technology, WIT Transactions on Ecology and the Environment; 2006. p. 251-262.

Dodet G., Bertin X., Taborda R. (2010) Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. Ocean Modelling 31, pp 120-131.

Fattal P., Maanan M., Tillier I., Rollo N., Robin M., and Ottier P. (2010) Coastal vulnerability to oil spill pollution: the case of Noirmoutier island (France), J. of coastal Res., 26(5), 879-887.

Grabemann I. and Weisse R. (2008) Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study, Ocean Dynamics (2008) 58:199–212, DOI 10.1007/s10236-008-0141-x.

Idier , Falquès, Mallet , Castelle, Parisot, Le Cozannet and Delvallée (2009), Shoreline sandwaves along the Aquitanian Coast (France): influence of climate change, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU General Assembly 2009.

Idier D. Rohmer J., Turpin V. Et Magnan A. (2010) A risk based approach for coastal risk assessment: development of an inverse methodology, Journées « impact du changement climatique sur les risques côtiers », 15-16 nov. 2010, Orléans.

Le Cozannet G., Lecacheux S., Delvallée E., Desramaut N., Oliveros C., Pedreros R. (2010), Teleconnection Pattern influence on sea wave climate in the Bay of Biscay, Journal of Climate, in press.

Thiébot J., Idier D., Falquès A., Calvete D., Certain R., Garnier R. (2009) Modélisation de la morphodynamique des barres d'avant-plage par analyse de stabilité linéaire : application à la plage du lido de Sète, La Houille Blanche.

Parisot J.P., S. Capo, D. Rihouey, H. Howa, F. Desmazes et L. Fauque. Analyse de l'évolution morphodynamique de la plage du Truc Vert (Gironde) sur une période décennale. Communication acceptée à XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil des Sables d'Olonne 2010.

Poumadère M., Bohn Bertoldo R., Balouin Y., Idier D., Mallet C., Robin M., Ruz M.H., Oliveros C. (2010) Gouvernance des risques climatiques et vulnérabilité du littoral : méthodologie du scénario, de l'atelier de parties prenantes et des représentations sociales, Journées « impact du changement climatique sur les risque côtiers », 15-16 nov. 2010, Orléans.

Vinchon C., Idier D., Balouin Y., Capo S., Castelle B., Chateauminois E., Certain R., Crillon J., Fattal P., Hequette A., Maanan M., Mallet C., Maspataud A., Oliveros C., Parisot J.P., Robin M., Ruz M., Thiebot J. (2008) - Projet VULSACO. Vulnérabilité de plages sableuses face au changement climatique et aux pressions anthropiques. Module 1 : Caractérisation des sites. Rapport final, BRGM/RP-56618-FR, 114 p., 48 fig., 16 tabl., 7 ann.

LA VULNERABILITE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES AVEC UNE MODELISATION 2DH SUR QUATRE PLAGES FRANÇAISES

Philippe Larroudé

LEGI BP 53 38041 Grenoble, France, larroude@hmg.inpg.fr

Abstract:
First, we established a procedure for binding three codes to simulate realistic or idealized climates. This procedure is validated in terms of hydrodynamics and morpho-dynamic evolution. These models have been used as part of a cycle of meteorological simulations describing the evolution of monthly events or hydrodynamic factors. Then, the vulnerability can be studied: the vulnerability of the coast will be defined and studied on the basis of in situ observations and model results will come from a set of simulations based on different scenarios (current and 2030). We will evaluate, for all four French sites, the parameter of vulnerability against this set of scenarios.

1-Introduction

Dans un contexte de vulnérabilité au changement climatique, nous allons présenter la méthodologie de l'approche de modélisation pour analyser la vulnérabilité de plusieurs plages sur la côte française. Toutes ces études sont issues du le projet ANR VULSACO.

Les objectifs que nous avons atteints au cours de ce programme sont multiples. Tout d'abord, nous avons mis en place une procédure de liaison de trois codes de pouvoir simuler les climats réalistes ou idéalisés. Cette procédure est validée du point de vue de l'hydrodynamique et l'évolution morpho-dynamique (Larroudé, 2008). Ces modèles ont été utilisés dans le cadre d'un cycle de simulations météorologiques décrivant l'évolution mensuel ou événementiel des facteurs hydrodynamiques. Les résultats de simulations 2DH montrent un bon ajustement avec les données obtenues sur les plages.

Puis, la vulnérabilité peut être étudiée: la vulnérabilité de la côte sera définie et étudiée sur la base des observations in situ et des résultats des modèles qui sont issus d'un ensemble de simulations basées sur différents scénarios possibles (actuels et en 2030). Nous présenterons pour l'ensemble des quatre sites français la vulnérabilité au regard de certains paramètres (profil cross shore, direction du flux sédimentaire, …) pour l'ensemble des scénarios.

2-Méthode

En utilisant le code de calcul 2DH Telemac, nous avons mis en place une procédure quasi-permanente liant les calculs de houle (la modélisation de la houle se fait par l'intermédiaire du code Artemis qui résout l'équation de Berkhoff avec intégration des processus de dissipation par déferlement et frottement sur le fond), le calcul hydrodynamique et celui du transport sédimentaire (Camenen et Larroudé, 2003) (Fig. 1). La chaîne de calcul Telemac constitue un modèle complet utilisant la méthode aux éléments finis et permettant la réalisation de différents calculs hydrodynamiques sédimentaires.

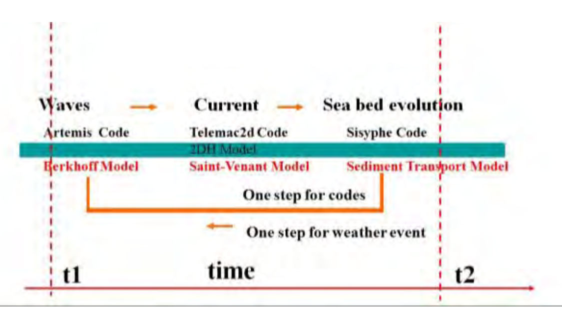


Figure 1 - Schéma du modèle (Artemis-Telemac-Sisyphe) boucle sur un pas de temps météorologiques événement (entre t1 et t2) utilisé pour nos simulations ATS. Pour les sites Noirmoutier et Dunkerque ont utilise (Tomawac-Telemac-Sisyphe : TTS).

Les équations des trois modules sont détaillées dans Hervouet (2007). Cette méthodologie de modélisation morphodynamique des plages de sable est déjà validée en termes de maillage, pas de temps et de convergence dans Falques et al. (2008) et Larroudé (2008). La figure 2 montre les comparaisons avec les données in-situ (ici le Truc Vert) pour les autres sites voir Maspataud et al. (2010) et les rapports ANR-Vulsaco. La présentation physique des sites est décrite dans Vinchon et al, 2008.

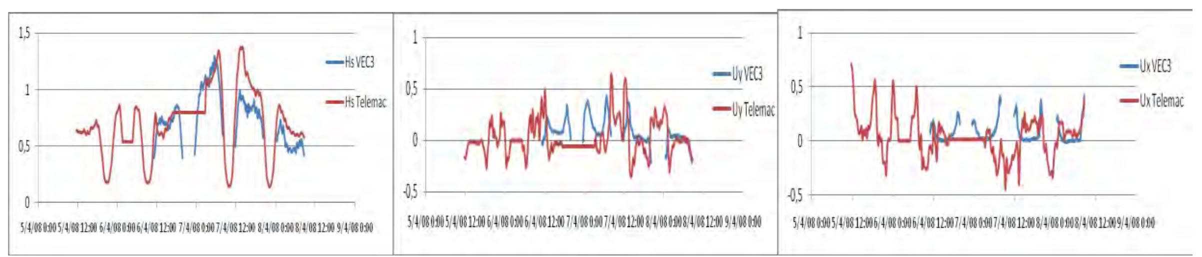


Figure 2 - Comparaison Hs, Ux (cross shore) et Uy (long shore) entre les valeurs numériques et les mesures in situ sur l'appareil VEC 3 (toutes les données in situ : EPOC Univ. Bordeaux).

3-Résultats

Nous allons présenter deux façons de regarder, éventuellement, la vulnérabilité des plages en analysant les résultats des simulations des différents scénarios proposés.

La première méthode est basée sur la méthode décrite dans Idier et al. (2006). Nous allons dans un premier temps regarder la taille de grain maximale mobilisée avec une approche plus simple. En effet le calcul de la contrainte au fond sera estimée seulement à partir de la vitesse issue des simulations couplées marée et houles ou houles seules suivant le site. On détermine aussi le Shields critique grâce à l'équation proposée par Soulsby et Whitehouse dans Soulsby (1997, p105). Puis on trouve la taille maximale de grain mobilisable par méthode inverse (voir les résultats dans les tables 1 à 4). Dans ces tableaux les colonnes représentent quatre scénarios : Scénario de base pour chaque site est le scénario construit à partir des données actuelles, puis un cas de simulation où on augment la surcote de 120%, un cas où on change la hauteur significative des houles au large de 10% et un cas où l'on change la direction des houles au large. Nous faisons les calculs de taille de grain maximale mobilisable en quelques points le long de profil cross shore sur chaque site (voir figure 3).

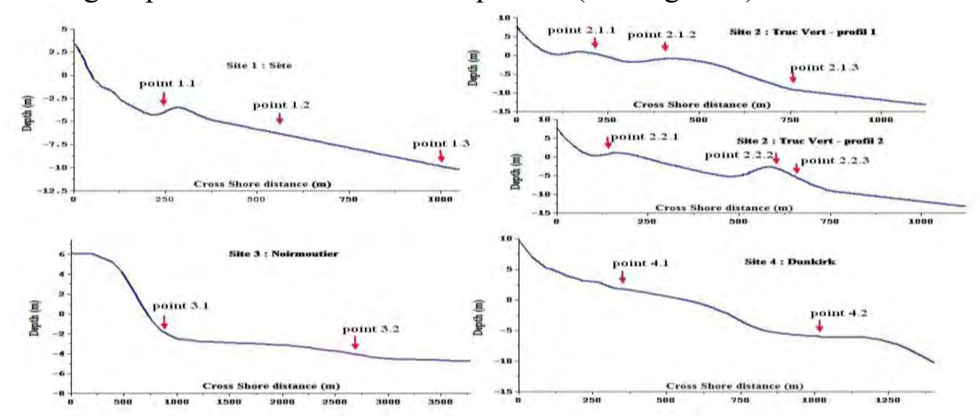


Figure 3 – Profils cross shore des quatre sites utilisés pour cette étude avec la situation des points utilisés pour les calculs des tailles de grain maximales.

La tendance générale est l'augmentation de la taille maximale même faiblement sauf en certains points pour certains scénarios.

Site 1 : Sète	Scénario de base	Surcote (Sc) +120%	Hs +10% Sc +120%	Incidence (-10°) Sc+120%
Point 1.1	0.00583	0.00584	0.00590	0.00580
Point 1.2	0.00580	0.00580	0.00580	0.00580
Point 1.3	0.00581	0.00581	0.00580	0.00580
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4

Table 1: Résultats du diamètre maximal mobilisable (m) avec la méthode inverse site de Sète.

Site 2 : Truc Vert	Scénario de base	Surcote (Sc) +120%	Hs +10% Sc +120%	Incidence (+10°) Sc+120%
Point 2.1.1	0.04307	0.02389	0.024122	0.03466
Point 2.1.2	0.04776	0.05012	0.041834	0.04778
Point 2.1.3	0.00657	0.00708	0.006945	0.00742
Point 2.2.1	0.02329	0.02635	0.025837	0.05493
Point 2.2.2	0.00847	0.00874	0.008820	0.00785
Point 2.2.3	0.00713	0.00734	0.007563	0.00721

Table 2: Résultats du diamètre maximal mobilisable (m) avec la méthode inverse site du Truc Vert.

Site 3 : Noirmoutier	Scénario de base	Surcote (Sc) +120%	Hs +10% Sc +120%	Incidence (-10°) Sc+120%
Point 3.1	0.00585	0.00588	0.00588	0.00588
Point 3.2	0.00591	0.00597	0.00596	0.00596

Table 3: Résultats du diamètre maximal mobilisable (m) avec la méthode inverse site de Noirmoutier.

Site 4 : Dunkerque	Scénario de base	Surcote (Sc) +120%	Hs +10% Sc +120%	Incidence (+10°) Sc+120%
Point 4.1	0.00893	0.00603	0.00605	0.006155
Point 4.2	0.00719	0.00682	0.00719	0.006610

Table 4: Résultats du diamètre maximal mobilisable (m) avec la méthode inverse site de Dunkerque.

Ce critère est donc à confirmer par l'analyse de l'ensemble des simulations mais il ne semble pas complètement pertinent pour la vulnérabilité ou non de la plage.
On peut le compléter par la deuxième méthode présentée dans ce papier : l'analyse de l'évolution temporelle des profils cross shore pour chaque site pour les mêmes scénarios présentés précédemment. Ce critère n'est pas convainquant sur les sites où les courants de marée sont prépondérants (Noirmoutier et Dunkerque). Ceux sont les sites où nous sommes le moins convaincus de la pertinence de nos résultats de morphodynamique avec nos simulations TTS. La figure 4 montre que l'étude de l'évolution du profil cross shore peut être complémentaire d'une étude de vulnérabilité par les indicateurs classiques. En effet on voit l'influence de l'augmentation de la surcote, du changement de direction ou de l'augmentation de la hauteur significative des houles sur l'évolution de plusieurs profils sur le site du Truc vert.

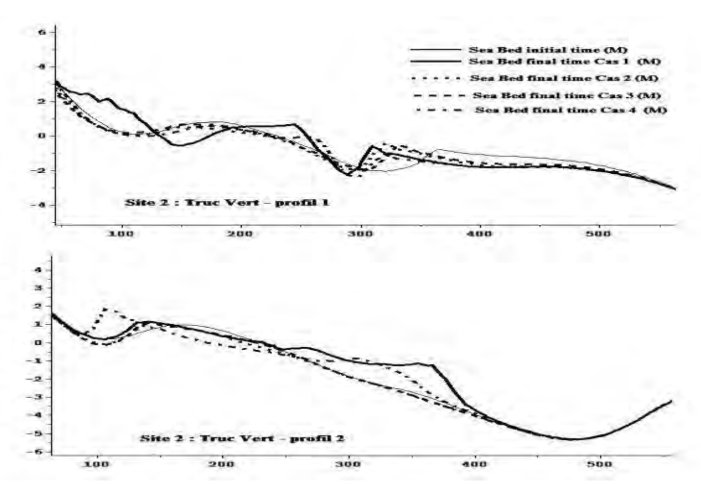


Figure 4 – Profil cross shore du Truc vert pour les quatre scénarios de la table 2.

4-Conclusion

Ces travaux nous ont permis de valider et d'améliorer nos procédures de calculs de l'évolution morpho-dynamique avec la chaine de calcul Telemac. Nous montrons dans cet article une première approche simplifiée sur ces données du calcul d'indicateur de vulnérabilité des plages sableuses. Cette approche nous montre des limites et doit être complétée par l'analyse complète des simulations des différents scénarios et par une approche plus classique de l'évaluation des indicateurs.

Remerciements

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme VMC (projet VULSACO, n° ANR VMC06-009).

References

Camenen, B. and Larroudé, Ph., 2003, Comparison of sediment transport formulae for a coastal environment, Journal of Coastal Engineering, 48, pp. 111-132.

Falques A., Dodd N., Garnier R., Ribas F., MacHardy L.C., Sancho F., Larroudé Ph. and Calvete D., 2008, Rhythmic surf zone bars and morphodynamic self-organization, Coastal Engineering 55, pp 622–641.

Hervouet, J.M., Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling With the Finite Element Method, 2007, John Wiley & Sons, 360p.

Idier D., Pedreros R., Oliveros C., Sottolichio A., Choppin L. et Bertin X., (2006), Contributions respectives des courants et de la houle dans la mobilité sédimentaire d'une plateforme interne estuarienne. Exemple : le seuil interinsulaire, au large du Pertuis d'Antioche, France. C .R. Geoscience, Vol. 338, 718-726.

Larroudé Ph., 2008, Methodology of seasonal morphological modelisation for nourishment strategies on a Mediterranean beach, Marine Pollution Bulletin 57, pp 45-52.

Maspataud A., Idier D., Larroudé Ph., Sabatier F., Ruz M.H., Charles E., Levacheux S., Hequette A., L'apport de modèles numériques pour l'étude morphodynamique d'un système dune-plage macrotidal sous l'effet des tempêtes : plage de la dune Dewulf, Est de Dunkerque, France, (pp. 353-360), DOI:10.5150/jngcgc.2010.042-M

Soulsby R., Dynamics of marine sand, Thomas Telford. 245 pp.

Vinchon C., Idier D., Balouin Y., Capo S., Castelle B., Chateauminois E., Certain R., Crillon J., Fattal P., Hequette A., Maanan M., Mallet C., Maspataud A., Oliveros C., Parisot J.P., Robin M., Ruz M., Thiebot J. (2008) - Projet VULSACO. Vulnérabilité de plages sableuses face au changement climatique et aux pressions anthropiques. Module 1 : Caractérisation des sites. Rapport final, BRGM/RP-56618-FR, 114 p., 48 fig., 16 tabl., 7 ann.

Analyse de l'évolution de la plage du Truc Vert (Gironde) sur une période décennale ; liens avec l'indice NAO

PARISOT [1] Jean-Paul, CAPO [1] Sylvain, RIHOUEY [2] Didier, HOWA [3] Hélène, DESMAZES [4] Franck et Laetitia FAUQUE [1]

1. Université Bordeaux 1, EPOC UMR 5805, Av. des facultés, 33405 Talence, France. parisot@epoc.u-bordeaux1.fr ; s.capo@epoc.u-bordeaux1.fr
2. CASAGEC, 1 allée du parc Montaury, 64600 Anglet, France. didier.rihouey@univ-pau.fr
3. UFR Sciences, UPRES EA 2644, 2 bd Lavoisier, 49045 Angers, France. helene.howa@univ-angers.fr
4. HOCER, 5 rue Eugène Bourdon. ZI de Kergaradec. 29490 Guipavas, France. franck.desmazes@hocer.com

Abstract

Depuis 1997, un suivi topographique régulier de la plage du Truc Vert est réalisé par le laboratoire EPOC de Bordeaux I. A marée basse, des profils *cross-shore* d'une longueur d'environ 250 m, allant du pied de la dune embryonnaire à la laisse de basse-mer ont d'abord été levés au théodolite entre 1997 et 2003, puis au GPS cinématique. Une campagne intensive (ECORS) en mars/avril 2008 a complété ce jeu de données. L'ensemble de ces profils a fait l'objet d'une mise en forme rigoureuse afin de constituer une série de données unique et homogène. La technique d'analyse factorielle (AFC), couramment utilisée pour caractériser l'évolution morphodynamique des plages sableuses, a été mise en œuvre pour analyser l'ensemble de la base de données. Une analyse fréquentielle a également été réalisée afin de déterminer la périodicité des variations morphologiques et hydrodynamiques et d'établir des corrélations entre les forçages (houle, marée). Une périodicité annuelle a principalement été dégagée. Des composantes périodiques trimestrielle et semestrielle apparaissent également ainsi qu'une période de l'ordre de 2/3 ans. Cette signature spectrale est également présente dans le forçage lié à la houle et dans l'indice NAO.

Introduction

Dans le cadre de l'ANR VULSACO, l'ensemble des mesures topographiques et bathymétriques réalisées depuis plus de 10 ans sur la plage du Truc Vert ont été rassemblées. Le suivi morphologique de cette plage a été initié par D. Michel et H. Howa en 1997 puis a été le lieu de nombreuses campagnes internationales. Dernièrement la mission ECORS qui a regroupé une large communauté scientifique a permis en particulier un suivi topographique quotidien de la plage en mars et avril 2008 (PARISOT *et al*., 2009).

De 1997 à 2003, le même profil de plage intertidale 1D, appelé profil maître, a été levé au théodolite (DESMAZES, 2005). Les levés topographiques effectués au GPS cinématique Trimble 5700, ont été réalisés à partir de 2003 et jusqu'en 2006 avec une fréquence bimensuelle ; à partir de février 2006 les levés deviennent mensuels. Les levés topographiques sont réalisés avec une précision centimétrique sur l'horizontale et la verticale. Les levés ont d'abord été réalisés à pied puis au Quad depuis janvier 2007, ce qui permet d'enregistrer des points en continu sur une plus grande emprise spatiale et ainsi obtenir une meilleure représentation de la configuration de la plage. A chaque marée basse de vives-eaux, 15 radiales (*cross-shore*) sont levées de la laisse de basse mer à la dune embryonnaire. La distance *long-shore* séparant chaque radiale est d'environ 25 m; l'emprise totale atteint 350 m. A partir de ces levés, les profils centraux correspondant aux profils maîtres réalisés auparavant au théodolite ont été extraits. La base de données globale contient 141 profils dont 73 ont été levés au théodolite et 68 au GPS cinématique. Les données ainsi traitées ont été

analysées par la méthode EOF développée par RIHOUEY (2004). Les données de forçage marin sont issues des archives du modèle développé à la NOAA *WaveWatchIII* (TOLMAN, 2002).

Analyse de l'évolution du premier mode spatial

Le mode temporel associé au premier mode spatial, représente les variations de l'altitude moyenne du niveau de sable sur la plage (figure 1). Dans l'ensemble, le profil moyen oscille saisonnièrement avec des topographies de plage plus élevées en été et plus basse en hiver. Du 22 mai 1998 au 14 février 2002 on constate un léger abaissement de l'altitude moyenne. Puis de février 2002 au 22 août 2005, l'augmentation de l'altitude moyenne traduit un engraissement général de la plage durant cette période. Entre le 22 août 2005 et le 6 novembre 2006, le profil de plage reste relativement stable. A partir de novembre 2006, on assiste de nouveau à un abaissement de l'altitude moyenne de la plage rendant compte d'une érosion progressive et relativement importante de ces 3 dernières années.

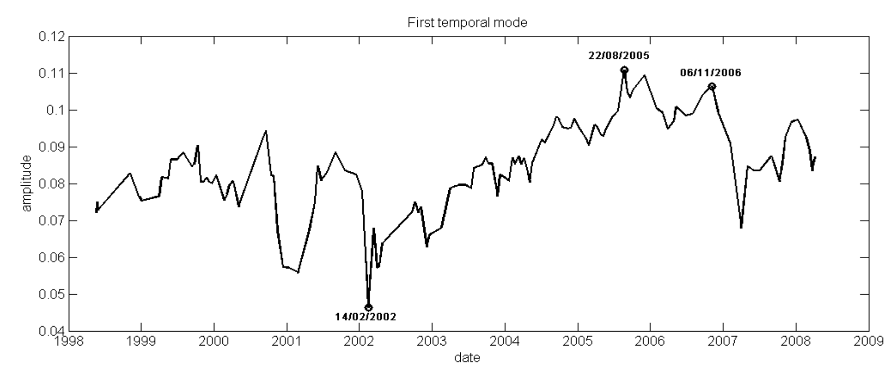


Figure 1. Evolution du premier mode spatial.



Figure 2. Comparaison entre le volume moyen annuel (continu) et le flux d'énergie moyen annuel (tirets) pour la période 1997-2007.

Si on compare l'évolution des volumes de plage et les flux d'énergie moyens annuels (figure 2), on remarque qu'une diminution de l'énergie entre 2002 et 2005 correspond à une augmentation du volume de la plage; cette tendance est moins évidente entre 1997 et 2002 et

on observe une anomalie en 2001. D'autre part on peut constater la présence d'une oscillation de période de l'ordre de 3 ans de l'énergie de la houle.

Liens avec l'indice NAO

Afin de comparer l'évolution temporelle de différents facteurs (indice NAO, mode 1 de l'analyse EOF et énergie incidente), nous avons réalisé une analyse en ondelettes comparative qui est présentée sur la figure 3. On remarque une forte périodicité à moyen terme comprise entre 2 et 3 ans. La périodicité de 2/3 ans apparaît nettement dans le signal de l'indice NAO mensuel normalisé, où une oscillation avec une période de 2 à 3 ans s'est déclenchée avant 1998 pour s'atténuer puis disparaître à partir de 2003.

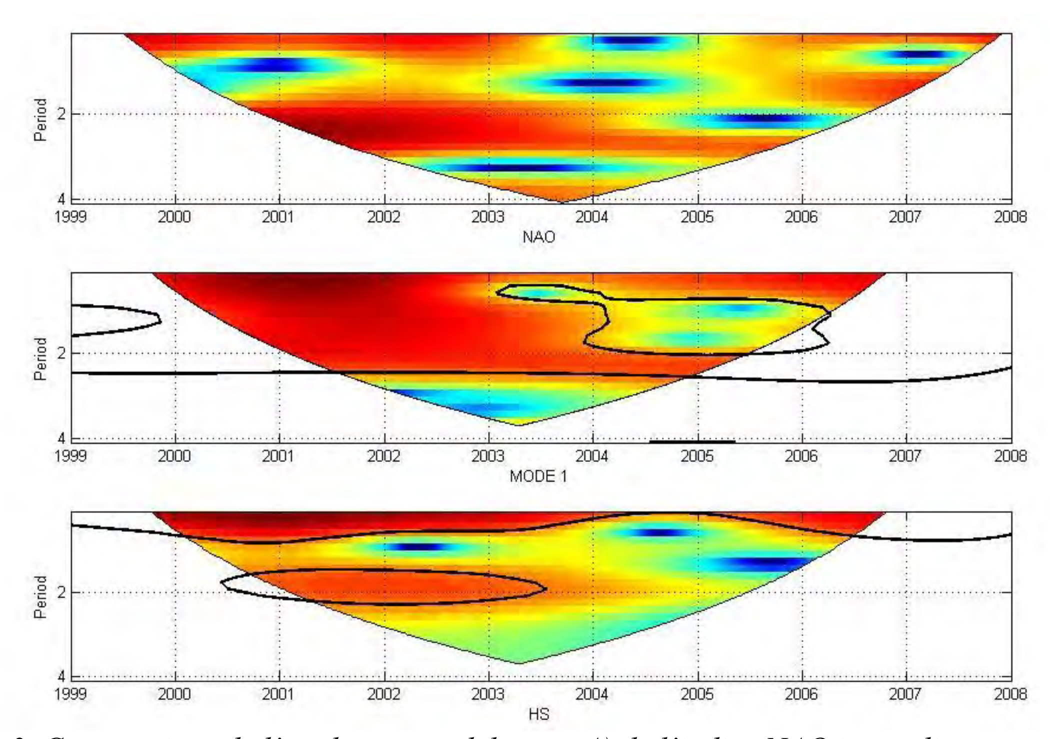


Figure 3. Comparaison de l'analyse en ondelettes : A) de l'indice NAO journalier ; B) du Mode 1 de l'analyse EOF ; C) de l'énergie incidente de la houle entre 1999 et 2008.

La figure 3 souligne une composante de période de 2 ans à la fois sur le signal de l'Indice NAO mais aussi sur les signaux du mode1 et de l'énergie de la houle. Cette périodicité semble s'être activée vers 1998 puis atteindre une intensité maximale entre 2001 et 2003 puis de s'atténuer et disparaître vers 2003. Une périodicité annuelle montre un signal fort sur l'ensemble des 3 signaux avec cependant une diminution de son intensité vers 2004 pour s'intensifier à nouveau vers 2005/2006. Ces résultats indiquent une action de combinaison de périodicités, allant de la saisonnière à la pluri-annuelle, sans pourtant en identifier de préférentielle sur l'ensemble des trois signaux ce qui est en accord avec les travaux de HURRELL et DESER (2009) sur l'indice NAO. Cependant la concordance de la périodicité de l'ordre de 2 ans entre le modèle, le flux énergétique lié à la houle et l'indice NAO semble indiquer une bonne corrélation entre ces derniers bien que le lien entre NAO et régime de houle ne soit pas évident dans le golfe de Gascogne ; les moyennes hivernales de l'indice NAO présentent en effet un coefficient de corrélation de 0.3 avec le Hs et de 0.5 avec les périodes pic (DODET *et al.*, 2010). Les données morphodynamiques de la Plage du Truc Vert confrontées aux données de l'indice NAO et du flux énergétique de la houle semblent pourtant montrer le contraire : une intensification de ces périodicités (de 1 an et d'environ 2 ans) sur les trois signaux entre 2000 et 2003, puis leur ré-activation vers 2006/2007

occasionne une érosion de la plage en relation avec une augmentation de l'énergie incidente à la côte en phase avec l'indice NAO alors que la diminution de l'intensité de ces périodicités saisonnières et pluri-annuelles coïncide avec une phase d'accrétion de la plage du Truc Vert entre 2002 et 2006.

Conclusion

Une légère érosion de la plage a pu être constatée de 1998 à 2002, suivie d'une période d'accrétion très nette entre 2002 et 2005. La plage est restée relativement stable jusqu'en 2006. Depuis les 3 dernières années, la plage du Truc Vert est globalement en érosion. Ce phénomène érosif a déjà été mis en évidence par GOURIOU (2007) qui a réalisé une étude comparative de l'évolution morphologique des plages de Biscarosse et du Truc Vert entre 2003 et 2007. L'analyse factorielle a ensuite été complétée par une analyse fréquentielle permettant de déterminer la périodicité des forçages hydrodynamiques. Une périodicité annuelle est clairement mise en évidence. On constate également des composantes saisonnières (3 mois et 6 mois) et une autre à plus long terme (2/3 ans) qui serait associée aux grosses houles et qui s'apparente à une signature de la NAO.

Références bibliographiques

DESMAZES F. (2005). *Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine. Exemple de la plage du Truc Vert*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 292 p.

DODET G., BERTIN X., TABORDA R. (2010). *Wave climate variability in the North East Atlantic Ocean over the last six decades*. Ocean Modelling 31, pp 120-131.

GOURIOU T. (2007). *Evolution morphologique d'une plage sableuse-Comparaison entre un site préservé et un site anthropisé*. Mémoire de stage de Master 2 ENVOLH, Université Bordeaux I, 30 p.

HURRELL J.W., DESER C. (2009). *North Atlantic climate variability: The role of the north Atlantic Oscillation*, Journal of Marine Systems, 78, pp 28-41

PARISOT J.P., CAPO S., CASTELLE B., BUJAN S., MOREAU J., GERVAIS M., REJAS A., HANQUIEZ V., ALMAR R., MARIEU V., GAUNET J., GLUARD L., GEORGE I., NAHON A., DEHOUCK A., CERTAIN R., BARTHE P., LE GALL F., BERNARDI P.J., LE ROY R., PEDREROS R., DELATTRE M., BRILLET J., SENECHAL N. (2009). *Treatment of topographic and bathymetric data acquired at the Truc-Vert Beach during the ECORS Field Experiment*. Journal of Coastal Research, SI56(2), pp 1786-1790.

RIHOUEY D. (2004). *Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses. Application aux sites d'étude du Programme National d'Environnement Côtier et aux plages d'Anglet*. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 196 p.

TOLMAN H.L. (2002). Alleviating the Garden sprinkler effect in wind wave models. Ocean modelling 4, pp 269-289.

IMPACTS DE LA DIMINUTION DE LA CHARGE SOLIDE DU RHONE SUR LA MOBILITE DU TRAIT DE COTE DELTAÏQUE DEPUIS LA FIN DU PETIT AGE GLACIAIRE

Grégoire M. Maillet[1], et Claude Vella[2]

[1] LEESA, Faculté des Sciences, Université d'Angers. gregoire.maillet@univ-angers.fr
[2] CEREGE, UMR 6635 Université Aix-Marseille 1. vella@cerege.fr

Abstract : Depuis le 19e siècle, la tendance à la réduction progressive de la charge solide du Rhône semble avérée mais il reste difficile d'en estimer l'impact sur l'évolution du littoral. Nos études ont eu pour but de quantifier l'influence des fluctuations temporelles des apports terrigènes sur l'évolution du littoral par rapport aux autres forçages, classés en deux groupes : (1) occurrence des crues, occupation du sol et artificialisation du fleuve et (2) variation du niveau marin, morphologie de l'embouchure et dynamiques marines. Cette étude a été menée d'abord à l'échelle du delta, puis au niveau des plages proches de l'embouchure. Elle montre d'une part que l'évolution du trait de côte deltaïque est déconnectée de la variabilité des apports fluviaux contemporains, l'essentiel de l'alimentation des plages depuis la fin du PAG provenant de stocks sédimentaires secondaires (biosédimentogenèse, démantèlement des lobes fossiles). D'autre part elle met en évidence une tendance générale au ralentissement de l'alimentation des plages, une consolidation des stocks sédimentaires marins et l'apparition récentes de périodes de recul.

Introduction

Cette étude a pour but de caractériser l'impact des différents forçages sur l'évolution du trait de côte du delta du Rhône. Pour ce faire une première approche basée sur la confrontation de cartes topo-bathymétriques a permis de réaliser une chronologie des évolutions du trait de côte deltaïque. Cette chronologie a ensuite pu être comparée aux diverses évolutions des forçages retenus (climatiques et anthropiques) pour tenter de discerner les causes de ces évolutions temporelles. Deux échelles spatiales ont également été retenues : l'échelle du delta du Rhône pour les évolutions globales et l'échelle de l'embouchure du Rhône et de ses plages adjacentes pour les évolutions plus fines.

Evolution du littoral deltaïque depuis la fin du P.A.G.

Nous disposons de cartes bathymétriques à l'échelle du Delta depuis 1841. Une comparaison des MNT entre 1841 et l'actuel (Fig. 1) montre que le budget sédimentaire global du Delta dans la zone [0 ; -20m] est positif de **+620 millions de m^3, soit un apport annuel moyen d'environ 4 millions de m^3.** La répartition spatiale de ces différentes zones montre que :

- les apports fluviaux sont très largement retenus à proximité des embouchures actives,
- les seules autres zones en accumulation sont les flèches littorales, qui sont alimentées par les courants de dérive littorale,
- les secteurs en forte érosion sont principalement les anciens lobes prodeltaïques situés au droit des embouchures des anciens chenaux (cas du Bras de Fer dès 1841, et de Pégoulier pour la période 1895-actuel), ou situés à l'embouchure des chenaux du Rhône dont la morphologie ne permet pas un apport sédimentaire conséquent à leur embouchure (cas du Petit Rhône depuis 1841).

Il apparaît ainsi que **le bilan sédimentaire global du delta dépend essentiellement de l'état des lobes prodeltaïques** qui montrent une tendance rapide à l'érosion dès le changement de position du chenal. Au final, l'étude de l'évolution du delta du Rhône au cours des deux derniers siècles montre une déconnexion totale entre l'hydrologie du fleuve et l'évolution du delta ainsi qu'entre la zone d'embouchure (qui concentre l'essentiel des apports

contemporains du fleuve) et le reste du linéaire côtier. De même, cette étude fixe les temps de réponse de l'environnement littoral à des évènements majeurs du type avulsion, et met en lumière la rapidité de la reprise des stocks sédimentés sur les lobes prodeltaïques abandonnées, et le rôle de ces stocks dans l'alimentation du littoral deltaïque. Le secteur de l'embouchure semble ainsi conditionner à lui seul « l'état de santé moyen » de la plaine deltaïque. Il est donc nécessaire d'en cerner précisément les mécanismes d'évolution.

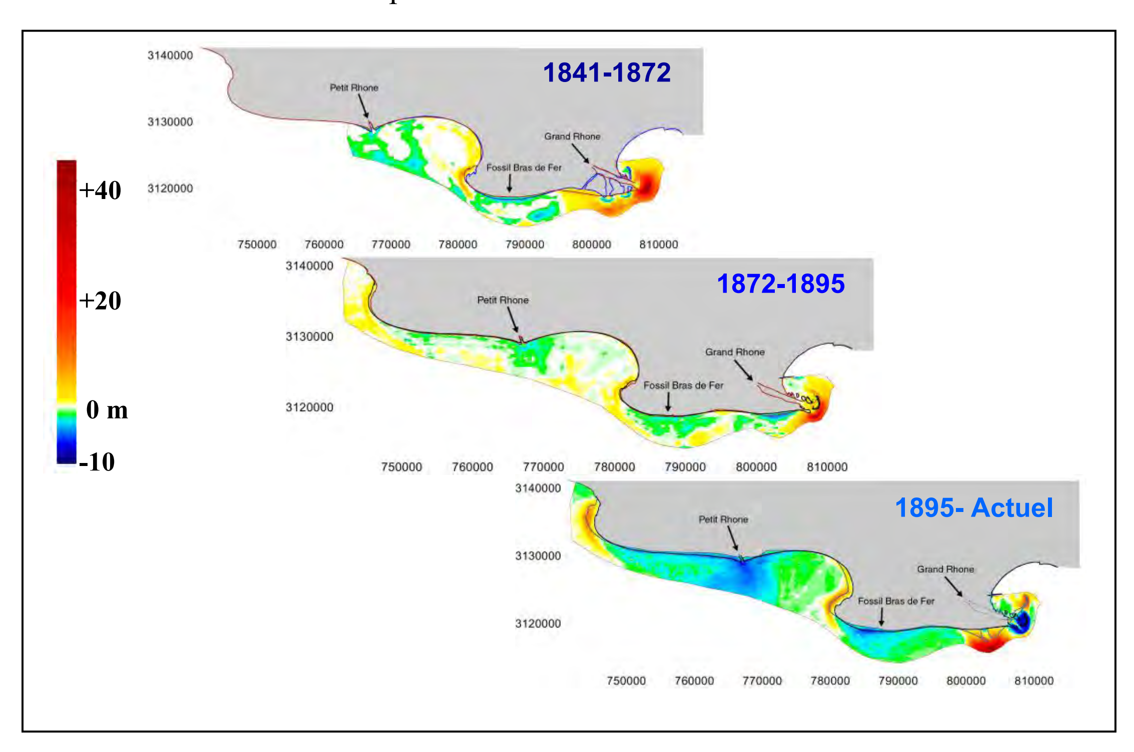


Fig. 1 : Evolution des fond marins entre 0 et –20 m au cours des 19ème et 20ème siècles, basée sur la comparaison différentielle de Modèles Numériques de Terrain.

Relations entre l'édification de la plaine deltaïque et le lobe actif.

Dans la zone présentée sur la figure 2, on peut observer les 6 derniers kilomètres du Rhône, avant son arrivée en mer. **Le chenal**, profond en moyenne de 8 m mais plus fortement incisé en rive gauche, est faiblement sinueux et obstrué en rive droite par une flèche littorale s'appuyant sur une importante dune hydraulique longitudinale. **L'embouchure** présente une asymétrie générale vers l'Est, témoin des effets de la dérive littorale de direction Ouest - Est. Une importante barre d'embouchure en forme de croissant constitue la partie

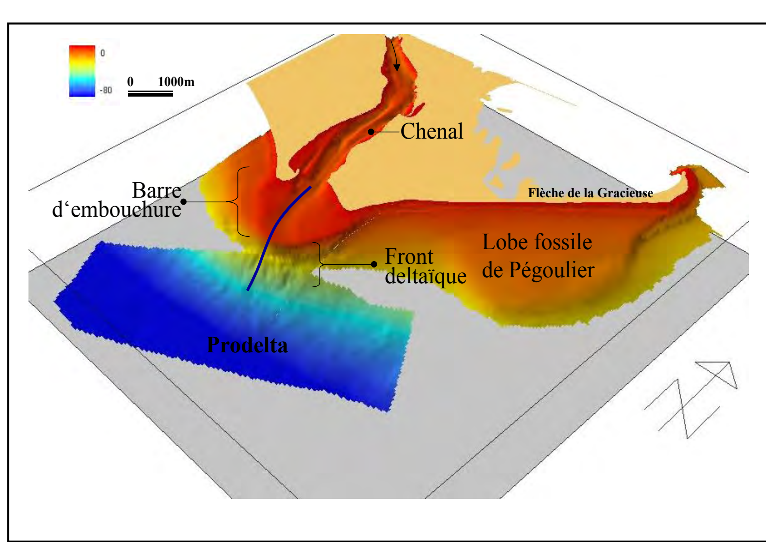


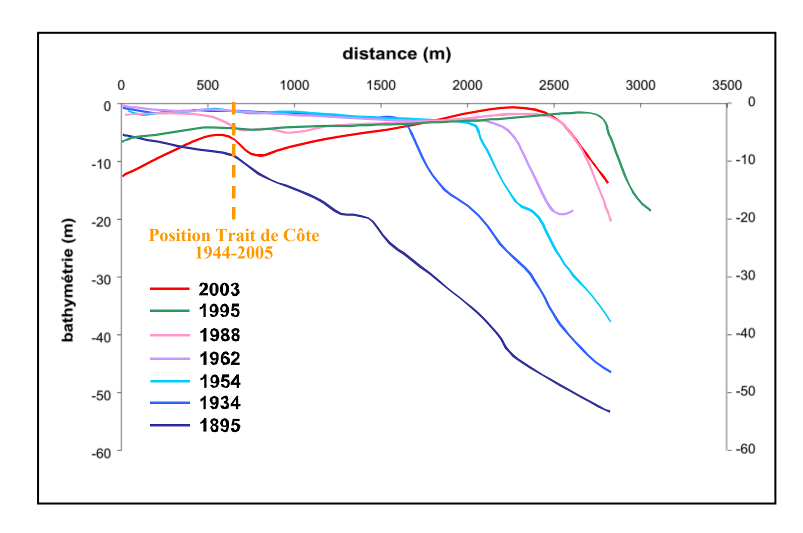
Fig. 2 : Morphologie sous-marine actuelle de la zone d'embouchure de Roustan et de Pégoulier. Le trait bleu correspond au profil de la figure 3

sommitale du lobe sous-marin. Plus au large, **le front deltaïque** s'étend de -4 m à -20 m avec une pente moyenne supérieure à 4°. Sous le front deltaïque, on trouve **le prodelta**, dont la frontière topographique avec les dépôts de plate-forme continentale est estimée autour de -80 m. La figure 2 nous présente également une image de la morphologie du lobe abandonné de Pégoulier, sur le démantèlement duquel s‘appuie l‘édification de la flèche de la Gracieuse. L‘évolution de cette zone peut être appréhendée grâce à 7 relevés bathymétriques réalisés depuis l‘ouverture de l‘exutoire de Roustan. En procédant à la superposition de profils topographiques (Fig. 3), il est possible de constater que l‘édification du lobe s‘est réalisée de manière constante jusqu‘en 1995, avant de subir un net recul entre cette date et 2003. La position du trait de côte étant stable depuis 1944 (Sabatier et al, 2006), on peut s‘étonner de voir le lobe s‘avancer en mer sans qu‘il y ait pour autant émersion et avancée de la plaine deltaïque.
Si l‘on s‘intéresse à cette évolution en terme de volumes, on constate que les zones en accumulation restent prépondérantes jusqu‘en 1988, puis se restreignent au front deltaïque dans l‘axe du chenal. Depuis les années 80, les zones en érosion dominent, et le bilan global est négatif depuis 10 ans. De manière générale, il convient de noter que cette érosion s‘effectue sous forme d‘un arasement généralisé de l‘ensemble de la barre, c‘est à dire, du sommet du lobe sous-marin. Cette tendance nette à l‘érosion du lobe par son sommet constitue l‘interrogation essentielle à lever pour tenter d‘expliquer l‘actuel déficit sédimentaire du littoral deltaïque.

Evolution qualitative historique de la charge solide rhodanienne

Nous disposons de deux types de données nous permettant de dégager une idée précise de l‘évolution respective des matières en suspension (MES) et de la charge de fond,

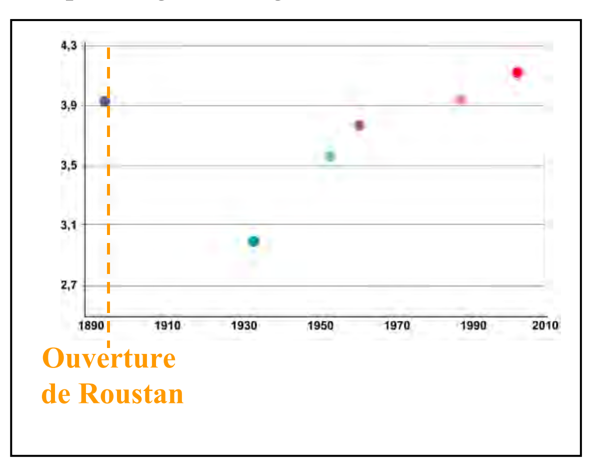
Fig. 3 : Superposition des profils bathymétriques historiques au droit de l’embouchure de Roustan (localisation sur la Fig. 2).



principalement sableuse.
- La première consiste en une compilation bibliographique des études sur le sujet (Maillet et al, 2006) qui permet de constater qu‘à la fin du 19ème siècle, la charge en suspension annuelle était estimée par Guerard (1895) à 5.22 millions de m^3 et la charge de fond à 18 millions de m^3, soit un rapport MES/sable de ¼. Inversement, à la fin du 20ème siècle, les auteurs estiment à environ 10% la part de la charge de fond dans le débit solide total annuel, avec une charge en suspension estimée à environ 9.0 millions de m^3 Ainsi, en 100 ans, et sur la base de ces mesures, peut-on observer une inversion totale du rapport entre charge en suspension et charge de fond. Inversion essentiellement due à une réduction drastique de la charge de fond au cours du 20ème siècle, tandis que la charge en suspension se maintient dans une fourchette relativement constante au regard de l‘extrême variabilité des années hydrologiques. Ces données restent bien évidemment sujettes à discussion. Néanmoins, sur la base de ces données bibliographiques, il nous faut considérer que la tendance à l‘affinement des apports solides du Rhône est nette.

- La seconde manière de caractériser l'évolution « qualitative » des apports solides du Rhône se base sur une approche morphologique en mesurant les pentes associées à chaque année pour lesquelles nous disposons d'un relevé bathymétrique. Ainsi, nous pouvons observer (Fig. 4) que la pente du lobe actuel n'a pas cessé de croître au cours de l'édification du lobe, pour atteindre la valeur actuelle de 4,13°. Or de nombreux auteurs s'accordent à penser qu'il y a une corrélation positive directe entre l'augmentation de la teneur des sédiments en particules grossières et l'augmentation de la pente des dépôts (Orton et Reading, 1993 ; Iverson, 1997…). Suivant cette hypothèse morphologique, il nous faudrait considérer, à l'inverse de la conclusion bibliographique, que, au cours du 20ème siècle, puisque la pente augmente, la proportion de sable dans les dépôts prodeltaïques augmente également.

Fig. 4 : Evolution de la pente du front prodeltaïque (en degrés) depuis l'ouverture du chenal de Roustan.



Conclusions

La conclusion de cette étude n'est donc que partielle. **Nous souhaitions comprendre comment l'évolution des apports rhodaniens influençait la progradation deltaïque.** On constate que la très forte capacité de rétention du lobe actuel, et l'épuisement des stocks anciens semblent expliquer la vulnérabilité actuelle du littoral deltaïque. L'étude historique montre la faiblesse des transferts particulaires entre le lobe et le littoral proximal en l'absence d'avulsion On a observé par ailleurs (Maillet et al. 2010) que les périodes de crue ne favorisaient pas (ou plus ?) non plus la progradation du delta, mais, au contraire, entraînaient souvent l'érosion du littoral à proximité de l'embouchure.

Concernant la diminution globale de la charge solide totale, si elle apporte des réponses en termes de tendance à basse fréquence, elle n'explique pas la stagnation récente du trait de côte au niveau de l'embouchure. En cas d'apports faiblissants, on pourrait s'attendre à une avancée lente ou à un recul, mais pas à une stagnation depuis 1945. Cette observation nous a conduit à considérer la variation du ratio charge en suspension / charge de fond comme potentielle explication, en raison du confinement des sables dans les zones les plus érodées du lobe sous-marin et de leur transfert préférentiel très ponctuel (dans le temps et dans l'espace) vers le prodelta.

Le littoral du Grand Rhône apparaît ainsi comme un système complexe structuré par des mécanismes fonctionnant au sein d'un emboîtement d'échelles spatiales et temporelles très contraignant. La relation entre le fleuve et le littoral deltaïque est régit par une combinaison de forçages multiples et parfois interdépendants, qui rend la compréhension du rôle de chacun très difficile à maîtriser.

Bibliographie

Guerard A., 1895. Mouth of the River Rhone. *In J. Forrest (Ed.)* Excerpt Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 82 (4), 34p.

Iverson R.M., 1997. The physics of debris flows. Review of Geophysics ; 35 (3), 245-296.

Maillet G.M., Vella C., Provansal M. Et Sabatier F., 2006. Connexions entre le Rhône et son delta (partie 2) : évolution de l'embouchure du Rhône depuis le début du 18e siècle. Géomorphologie, 2, 125-140.
Maillet G.M., Poizot, E. Sabatier F., Vella C., et Méar Y., 2010. Sediment transport pattern in a microtidal river mouth using geostatistical sediment trend analysis (GSTA). The case of the Grand Rhone River, France. Journal of Sedimentary Research. Sous presse.
Orton G.J. et Reading H.G., 1993. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. Sedimentology, 10, 475-512.
Sabatier, F., Maillet, G.M., Fleury, J., Antonelli, C., Suanez, S., Provansal, M., et Vella, C., 2006, Long term relationships between river sediment input and littoral bathymetric change in a microtidal deltaic system. Marine Geology, 234, 143-157.

Les méga-blocs de la bordure orientale du Golfe de Fos : marqueurs de tempêtes exceptionnelles de sud-ouest

Claude, Vella[1], Efim, Pelinovski[2], François, Demory[1], Victor, Canut[1], Philippe Dussouillez[1]
Jules Fleury [1]

[1]CEREGE, BP80 13545 aix en provence cedex 04, vella@cerege.fr
[2]Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, 46 Uljanov Street, 603950, GSP-120, Nizhny Novgorod, Russia, enpeli@mail.ru

1. Introduction : Les blocs déplacés par les tsunamis et les tempêtes sont répertoriés sur l'ensemble des littoraux de la planète. Pour les évènements anciens, historiques, préhistoriques ou pléistocènes il est souvent difficile de faire la part entre les vagues dont l'origine est un tsunami ou une tempête (Nott, 2000 ; Mastronuzzi and Sansò, 2000 ; Mastronuzzi *et al.*, 2007 ; Maouche *et al.*, 2009). Lors d'évènements récents ou dans le cadre de suivis littoraux l'origine et les caractéristiques physiques des vagues ont pu être mises en évidence lors de déplacement de mégablocs (Noormets *et al.*, 2002 ; Nott, 2004 ; Goto *et al.*, 2009 ; Suanez *et al.*, 2009 ; Goto *et al.*, 2010). Dans le cas étudié ici, le littoral de Provence occidentale n'est pas connu pour des mégablocs déplacés par des vagues et le site de Carro est à notre connaissance le premier site en Méditerranée française où l'on observe de tels processus. Cette découverte est d'autant plus importante que le littoral en question est à proximité de zones urbaines et industrielles du Golfe de Fos. La récurrence de tels évènements pourrait avoir des conséquences en termes de risques sur les personnes et les biens (figure1).

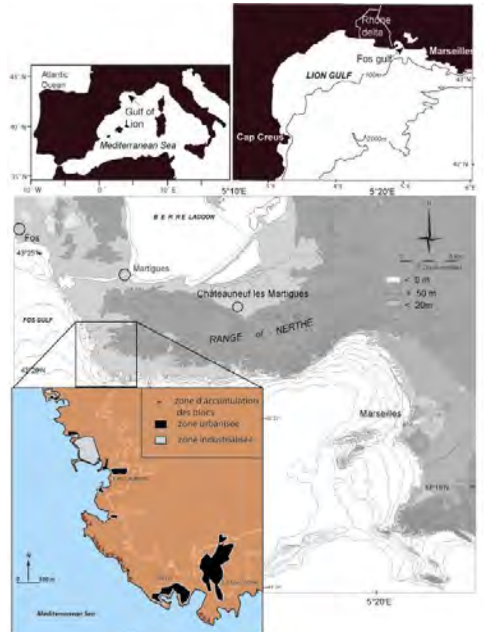


Figure 1 : Localisation de la zone étudiée

2. Le cadre géographique et géologique du golfe de Fos et de la terminaison du massif de la Nerthe

Le littoral étudié s'étend sur la côte rocheuse du sud-est du Golfe de Fos entre Golfe du Lion et terminaison de la Basse Provence calcaire. Ce secteur constitue la limite entre le domaine d'extension oligocène du Golfe du Lion où un système complexe de grabens et de horsts assure la remontée du substratum anté-rift vers l'est et le massif de la Nerthe. Le

basculement Mio-pliocène de la Provence méridionale génère un plongement progressif des structures secondaires et des dépôts marins burdigaliens (Miocène inférieur) dans le golfe de Fos, sous la forme de plateforme structurale et/ou marine. Ces plateformes sont discontinues, tantôt entaillées par des vallées sous-marines peu profondes qui se prolongent à terre par des calanques, tantôt effondrées par le jeu de faille locales non exprimées à terre. Il résulte de ce dispositif structural et lithologique une côte basse, orientée N160°, précédée en mer par une avant-côte rocheuse peu profonde à plongement lent vers le sud-ouest interrompue très ponctuellement par des portions de côte à falaise de très faible hauteur (1 à 2m) non précédée par un platier marin protecteur des houles (figure 2).

Les profils bathymétriques réalisés à partir des levés de sondes du SHOM (1978) mettent en évidence cette morphologie sous-marine et permettent d'expliquer en grande partie la localisation préférentielle des accumulations de blocs sur ce littoral (figure3). En effet, au droit des accumulations dans la direction O à SO le profil bathymétrique plonge rapidement en dessous des 10 mètres de profondeur. Les houles et vagues exceptionnelles, abordant la côte depuis ces directions, ne seront pas ralenties par la morphologie sous-marine au droit des zones d'accumulation de blocs contrairement à la zone située en arrière du platier (profil AB).

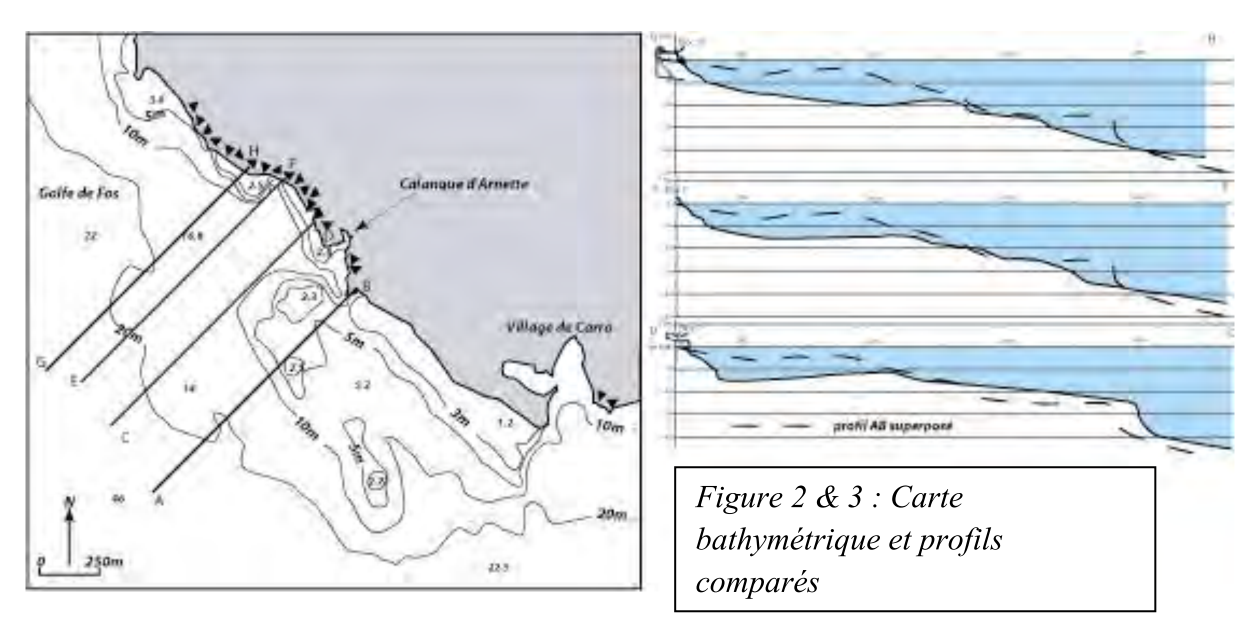


Figure 2 & 3 : Carte bathymétrique et profils comparés

3. Les accumulations de blocs

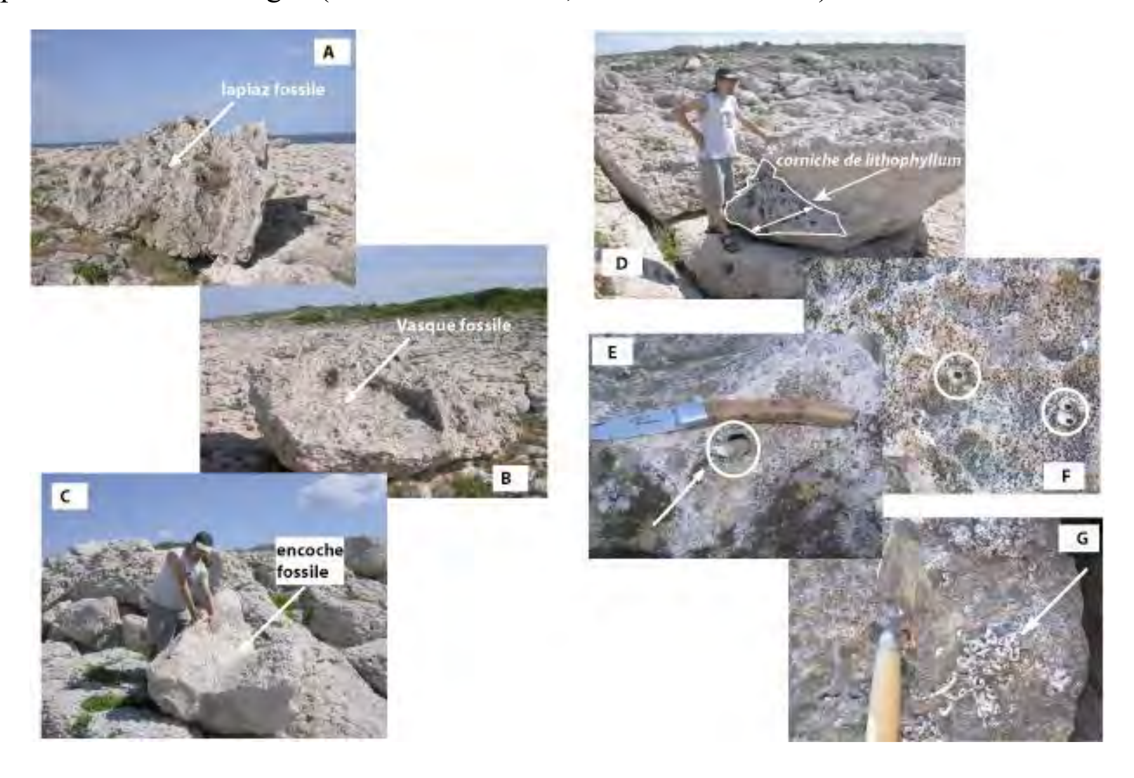
Les amas de blocs sont par leur forme et par leur taille de plusieurs types. Les accumulations forment des imbrications parfois en écaille. Immédiatement au nord de la calanque d'Arnette ou dans les parties proches de la côte, les blocs sont le plus souvent isolés de grande ou petite taille. Plus au nord, dans les parties éloignées du rivage d'une quarantaine de mètre les accumulations forment un cordon allongé plus ou moins continu de direction N125° à N140°, parallèle à la côte. Au sud de la calanque d'Arnette, les accumulations forment trois courts amas parallèles à la côte. Certains blocs ont fait l'objet d'une plus grande attention de par leur taille exceptionnelle, leur forme ou les faunes marines fixées sur leurs surfaces (tab.1).

Echantillon	**lithologie**	**Latitude**	**Longitude**	**Distance à la mer (m)**	**Volume (m^3)**	**altititude en m NGF**	**Densité moyenne (g/cm^3)**	**Masse estimée (t)**
Block3	Calcaire coquillier	43°20.199'	5°01.747'	39.2	13.63	2.17	*2.729*	37
Block4	Calcaire coquillier	43°20.214'	5°01.739'	29.5	1.17	-	*2.742*	3.20
Block5	Calcaire coquillier	43°20.304'	5°01.568'	13.4	0.546	3.64	*2.731*	1.49
Block6	Calcaire coquillier	43°20.298'	5°01.542'	4.70	1.728	1.48	*2.720*	4.7

Block7	Calcaire coquillier	43°20.301'	5°01.537'	5	5.83	1,26	*2.707*	17,78
Block8	Calcaire coquillier	43°20.304'	5°01.543'	13.80	0.969	2.65	2.678	2.59
Block9	Calcaire coquillier	43°20.304'	5°01.520'	14.20	3.588	2.87	*2.684*	9.63

La densité a été mesurée pas pycnomètre et donc ne tient pas compte de la porosité connectée avec l'atmosphère.

Le plus gros bloc étudié (37 tonnes) est situé à 39m du littoral et à une altitude de 2,17m NGF. Ce bloc porte des karsts caractéristiques de la zone basse de l'infralittoral (Photo AB). On peut estimer la distance parcourue à partir de ces formes ainsi que la hauteur du soulèvement en comparant la position actuelle des karsts littoraux et la position du bloc après son déplacement. D'autres blocs, portent des traces encore plus précises, l'un d'eux est un fragment de l'encoche médio-infralittorale de falaise (Photo C). Le bloc a été soulevé de 2,65m et déplacé vers l'intérieur de 14m environ. Alors que dans le premier cas il n'est pas possible de dater le déplacement, dans le cas de l'encoche les faunes marines associées à l'encoche (lithophages et vermets) permettent de dater la période où le bloc se trouvait encore en position semi-immergée (550 BP +/- 35 BP ; 1703/1950 cal AD).



Photographies : vue des formes littorales (ABC) et des faunes fixées (DEFG)

De très nombreux blocs portent une faune marine fixée typique de l'infralittoral supérieur ou du médiolittoral (Photo DEFG), 7 d'entre eux ont été échantillonnés et datés au 14C. Les faunes datées sont variées (Lithophages, Photo E ; vermets, Photo G ; *Lithophyllum bissoïdes*, photo D ; balanes, Photo F). Les datations à l'exception d'un résultat sont comprises entre la fin du Moyen-Age et l'actuel (tab.2). L'une des dates, 4200+/-35, est très ancienne. Une mobilisation immédiatement postérieure à cette date paraît peu probable et une pollution par le carbonate du bloc miocène est envisageable car la position du niveau marin pour la période est située à au moins 2m sous le niveau marin actuel (Vella *et al.*, 2005), une telle mobilité est difficilement envisageable. Enfin, le *Lithophyllum* forme sur l'un des blocs une corniche bio-construite exceptionnellement conservée. La corniche de lithophyllum est typique du médiolittoral inférieur, elle marque en Méditerranée le niveau marin de façon exceptionnelle à quelques centimètres près. Cette corniche permet d'estimer le déplacement vertical à 3m entre la période de construction de la corniche et la position actuelle.

Echantillon	Latitude	Longitude	Distance à la mer (m)	Volume (m^3)	altititude (m NGF)	Materiel daté	Code laboratoire	^{14}C yr B.P.	Cal B.C./A.D. 2 σ
Bloc2	43°20.302‘	5°01.546‘	12	0.3	2.18	*Serpulidae sp*	Poz-37456	415+/-30	1772-<1950
Bloc5	43°20.304‘	5°01.568‘	13.4	0.546	3.64	*Serpulidae sp.*	Poz-37455	585+/-30	1678-<1950
Bloc6	43°20.298‘	5°01.542‘	4.70	1.728	1.48	*Balanus sp.*	Poz-37454	108.19 +/- 0.34 pMC	1905-1930 AD
Bloc7	43°20.301‘	5°01.537‘	5	5.83	1,26	*Lithophyllum bissoïdes*	Poz-37461	895 +/-30	1395-1630
Bloc8	43°20.304‘	5°01.543‘	13.80	0.969	2.65	*Serpulidae sp.*	Poz-37460	550+/-30	1703-<1950
Bloc9	43°20.304‘	5°01.520‘	14.20	3.588	2.87	*Lithophaga lithophaga*	Poz-37459	1035 +/-30	1292-1457 AD
Bloc10	43°20.312‘	5°01.491‘	17.20	2.023	1.19	*Serpulidae sp.*	Poz-37457	4200+/-35	2458-2100 BC

4. Conclusion :

Les blocs du littoral de Carro à la sortie du Golfe de Fos sont les premières manifestations de vagues exceptionnelles de SO sur le littoral français méditerranéen. Ces vagues sont probablement associées à des tempêtes exceptionnelles, dont la récurrence et la force sont rares. L‘existence de phénomène combiné tsunamis et vagues de tempêtes est envisageable. Cependant le nombre déjà important d‘évènements (au moins 4) mis en évidence à partir de seulement 7 datations radiocarbones et l‘état de fraîcheur des faunes, ainsi que leur coloration ou l‘état très variés de colonisation par des lichens sont des indices d‘événement très nombreux peu compatible avec une multitude de tsunamis compte tenu des connaissances tectoniques et sismiques dans le bassin méditerranéen provençal.

5. Références :

Goto, K., Okada, K., Imamura, F.: Characterictics and hydrodynamics of boulders transported by storm wave at Kudaka Island, japan. Marine Geology 262,14-24, 2009..

Goto, K., Miyagi, K., Kawana, T., Takahashi, J., Imamura, F.: Emplacement and movment of boulders by known storm waves-Field evidence from the Okinawa Islands, Japan. Marine Geology,*in press*, 2010.

Maouche S., Morhange C., Meghraoui M.: Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. Marine Geology, 262, 96-104, 2009.

Mastronuzzi G., Sansò, P.: Boulders transport by catastrophic waves along the Ionian coast of Apulia (Southern Italy). Marine Geology, 170, 93-103, 2000.

Mastronuzzi G., Pignatelli C., Sansò, P., Selleri G.: Boulder accumulations produced by the 20th february 1743 tsunami alongthe coast of southeastern Salento (Apulia region, Italy). Marine Geology, 242, 191-205, 2007.

Nott, J.: Records of prehistotic tsunamis from boulder deposits : evidence from Australia. Sci. Tsunami hazards 18, 3-14, 2000.

Nott, J.: The tsunami hypotesis-comparisons of the field evidence against the effects, on the Western Autralian coast, of some of the most powerful storms on earth. Marine geology, 208, 1-12, 2004.

Noormets R., Crook, K. A. W., Felton, E. A.: Sedimentology of rocky shorelines: 2. shoreline megaclasts on the north shore of Oahu Hawaii –origins and history. Sediment. Geol., 150, 31-45, 2002.

Suanez S., Fichaut B., Magne R.: Cliff-top storm deposits on Banneg island, Brittany, France : Effect of giant waves in the Eastern Atlantic Ocean. Sedimentary Geology, 220, 12-28, 2009.

Vella C., Fleury T. J., Racassi G., Provansal M., Sabatier F., Bourcier M.: Evolution of the Rhone delta plain in the Holocene. Marine Geology, 222-223, 235-265, 2005.

Mise en place d'une approche multi-modèles pour évaluer l'exposition du littoral languedocien aux submersions marines dans un contexte de changement climatique (Projet MISEEVA)

Pedreros Rodrigo[1], Lecacheux Sophie[1], Delvallée Etienne[1], Balouin Yann[1], Garcin Manuel[1], Krien Yann[1], Le Cozannet Goneri[1], Poisson Blanche[1] , Thiebot Jérôme[1]

[1] BRGM/RNSC/RIC BP 36009, 45018 Orléans Cedex 2, r.pedreros@brgm.fr

Abstract :

Les modèles numériques constituent un outil essentiel pour mieux analyser les événements passés et apprécier l'exposition future des côtes françaises aux submersions marines. Cette étude a pour objectif une évaluation de la submersion marine à deux échelles (régionale sur tout le Languedoc-Roussillon et locale sur des segments de plage) à trois échéances (actuelle, 2030 et 2100) et pour trois types de submersion (permanente, récurrente et exceptionnelle).
La méthodologie est basée sur l'utilisation de différents modèles numériques associés à des formules semi-empiriques. A chaque échelle, la méthodologie adoptée dépend de la précision des données topo-bathymétriques disponibles.
Ce papier présente la méthodologie globale adoptée ainsi que quelques résultats à l'échelle régionale. Les résultats à l'échelle locale et les incertitudes liées aux données et à la méthodologie sont en cours de réalisation.

Introduction

La submersion marine est liée à une élévation du plan d'eau due à la combinaison de processus physiques liés à des phénomènes météorologiques et astronomiques. La hauteur d'eau moyenne à la côte par rapport au niveau de référence comprend (cf Figure 3) : l'élévation du niveau de la mer, le niveau de la marée, la surcote atmosphérique créée par le vent qui pousse les masses d'eau vers la côte et à la dépression qui a un effet de baromètre inverse, la surcote due aux vagues ou set-up qui est une élévation locale du plan d'eau vers la côte due au déferlement des vagues. En plus de ce niveau moyen s'ajoute le jet de rive ou swash (masses d'eau projetées vers le haut de l'estran par le déferlement des vagues).

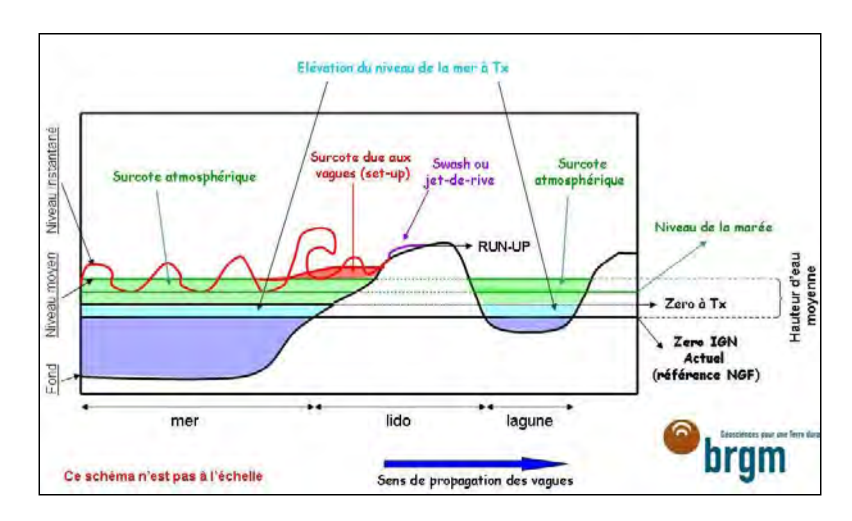


Figure 3. Schéma des phénomènes contribuant à la submersion marine.

L'objectif du volet modélisation de MISEEVA est de définir l'exposition actuelle et future du littoral languedocien aux submersions marines (i) à l'échelle de la région et (ii) sur trois sites locaux correspondants à des sections de plage autour de Palavas-les-Flots (cf. Figure 4, droite). Trois types de submersion (permanente, récurrente, exceptionnelle) sont définies pour les trois échéances du projet (2010, 2030, 2100).

Méthodologie

Hypothèses

Pour chaque échéance, on définit trois type de subersion. La submersion permanente correspond aux surfaces submergées lors des plus basses mers astronomiques, sans surcote atmosphérique et par climat de vagues moyen. La submersion récurrente correspond aux plus hautes mers astronomiques, sans surcote atmosphérique et climat de vagues moyen. Enfin, la submersion exceptionnelle correspond à un cas de tempête de référence.

Les hypothèses d'élévation du niveau de la mer (ENM) sont de 0.07 m en 2030 (GIECC2007) et de 0.35m (moyenne GIECC2007) ou 1m (Rahmstorf 2007) en 2100. Le climat de vague moyen est considéré comme inchangé. En ce qui concerne les tempêtes en Méditerranée, plusieurs études ont suggéré une légère diminution de leur fréquence (IMFREX 2003) mais aucune tendance significative ne ressort. La même tempête historique de référence est utilisée dans les trois scénarios de submersion exceptionnelle (du 6 au 8 nov. 1982) car elle est considérée comme la tempête à plus fort impact ces dernières années. La géomorphologie de la côte est considérée comme inchangée.

Données

Les données bathymétriques disponibles sont issues de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) à une minute de résolution et des sondes SHOM (HISTOLITT) à un degré de résolution. Deux types de données topographiques sont utilisées : le MNT IGN (résolution de 50mX50m et précision de 1m) pour l'échelle régionale et les données LiDAR (résolution de 2mX2m et précision centimétrique) pour l'échelle locale. La précision au mètre du MNT IGN induit une représentation des zones basses en marche d'escalier ce qui pose des problèmes pour l'estimation des surfaces submergées. Ce MNT a été retravaillé à partir des courbes de niveaux pour obtenir des valeurs plus progressives et continues.

Pour la modélisation de la tempête, les constantes de marée utilisées sont les données FES2004 du Legos. Deux sources de vent et de pression disponibles ont été testées : les données issues des ré-analyses NCEP-R2 (de la NOAA, de résolution 1.875° toutes les 6 heures) et CFSR (de la NOAA, de résolution 0,5° toutes les heures). Quant au climat de vague moyen, il a été calculé à partir des mesures de la bouée Golfe du Lion (42,11°N / 4,69°E).

Approche générale

La méthodologie est basée sur l'utilisation de différents modèles numériques associés à des formules semi-empiriques. La simulation des processus hydrodynamiques en mer est tout d'abord assurée par une modédisation emboîtée avec deux modèles (cf. figure 2, gauche). SWAN de l'université de Delft est utilisé pour la génération et la propagation des vagues au large et en zone côtière. MARS 2DH de l'Ifremer est utilisé pour le calcul du niveau d'eau et de ses variations dues aux marées et aux surcotes atmosphériques.

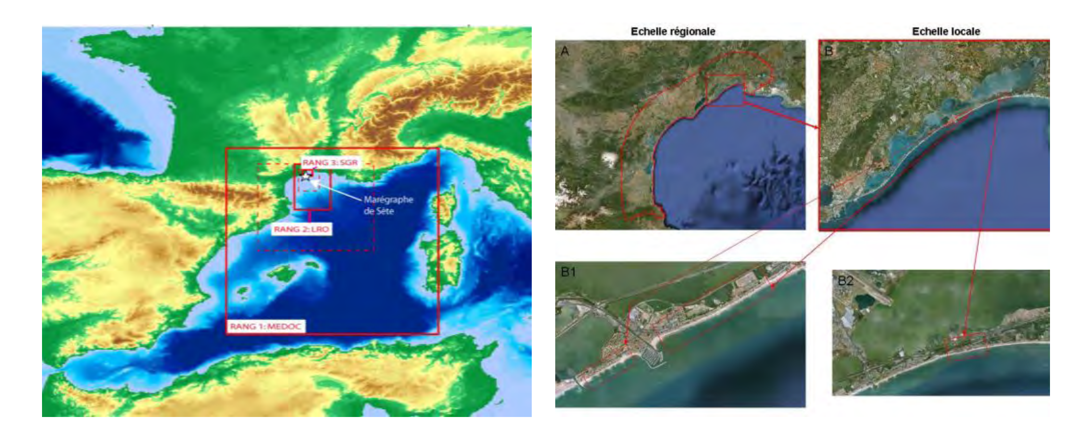


Figure 4 . Gauche : Emprises successives pour la modélisation (en trait continu, pour SWAN, en trait continu et pointillé pour MARS). Droite : Emprises des échelles régionales et locales.

Le calcul des zones inondées requiert une méthodologie différente selon l'échelle de travail :

- Pour l'échelle régionale, le set-up est calculé avec des formules semi-empiriques (Stockdon, 2006) puis le niveau total est croisé avec le MNT IGN retravaillé par le BRGM à l'aide d'un logiciel SIG pour déterminer les zones inondées.
- Pour l'échelle locale, le calcul de la submersion est effectué avec le code SURFWB (du laboratoire EPOC).

Aucun enregistrement de bouée ni de marégraphe n'étant disponible pour la tempête de 1982, l'implantation de la modélisation a été calibrée et validée avec la tempête de décembre 1997. Si les résultats de hauteur d'eau sont très comparables avec les deux sources de données, les vagues sont mieux représentées avec les données CFSR, particulièrement au moment du pic.

Résultats à l'échelle régionale

Simulation de la tempête de novembre 1982

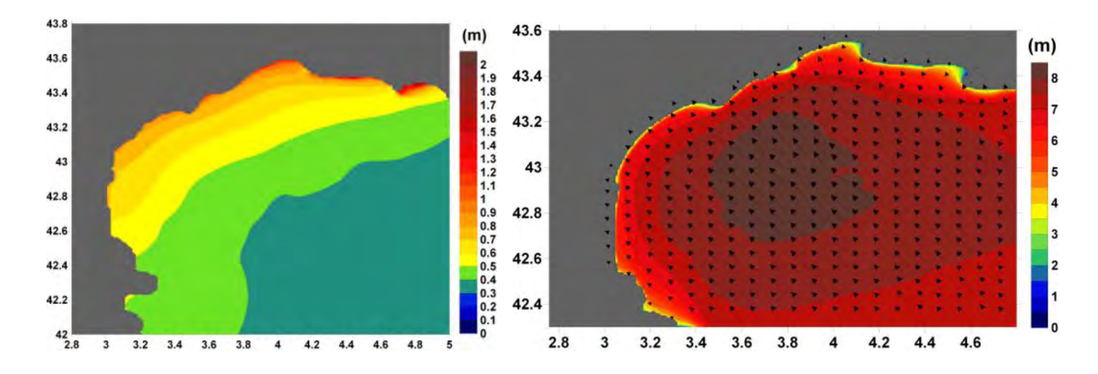


Figure 5. Résultats pour la tempête de 1982 avec les données NCEP-R2 (au pic de tempête). Gauche : Niveau d'eau simulé avec MARS. Droite : Hauteur et direction des vagues calculées avec SWAN.

A l'échelle régionale, les données NCEP-R2 ont été utilisées pour la modélisation car les données CFSR n'étaient pas disponibles en début de projet. Des tests ont montré qu'avec la méthodologie à l'échelle régionale et la précision des données topographiques, les surfaces submergées sont inchangées si les données CFSR sont utilisées. Les vagues calculées atteignent 8m de hauteur au moment du pic de tempête (cf. Figure 5). Le set-up correspondant

(déterminé avec les formules de Stockdon (2006)) reste assez faible et s'échelonne de 10cm à 20 cm sur la région. Quant au niveau d'eau (marée + surcote), il varie de 40 cm près de la frontière espagnole à 1,5m dans des baies plus enclavées (cf. Figure 5).

Cartographie de la submersion
La Figure 6 présente comme exemple les résultats obtenus pour 2100 (avec 1m d'ENM) pour les trois types de submersion au niveau de Palavas-les-Flots. On peut voir que l'intégralité du lido est concerné par au moins un des types de submersion, surtout par la submersion exceptionnelle. Sur cette carte, les incertitudes, liées aux données topo-bathymétriques notamment, n'ont pas encore été évaluées. A cette échelle de représentation, on remarque de nombreuses incohérences dans les surfaces submergées dues à la résolution et la précision du MNT utilisé (ex : canal et port de Palavas-les-Flots).

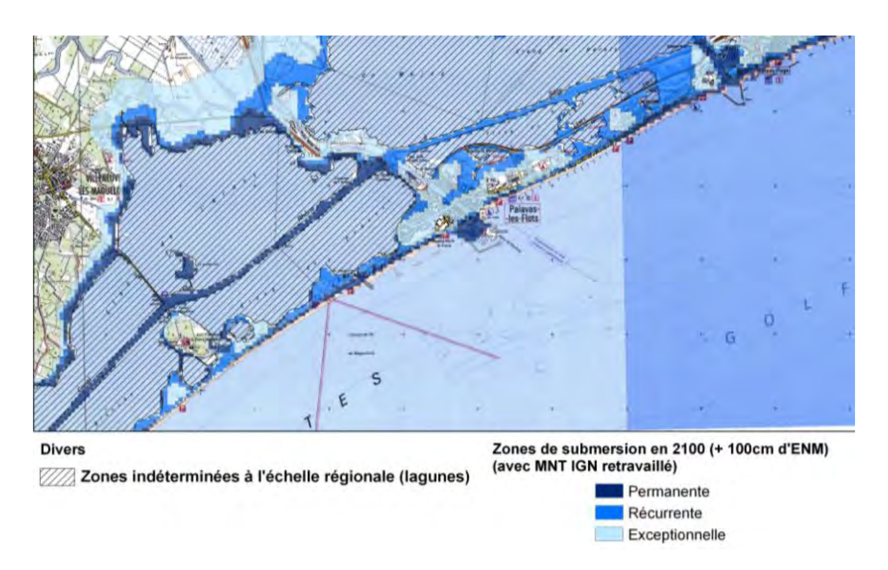


Figure 6. Carte des zones de submersion en 2100 avec une ENM de 1m (échelle régionale).

Conclusion et perspectives
Les résultats obtenus à l'échelle régionale donnent une première approximation des zones potentiellement concernées par la submersion dans un contexte de changement climatique et peuvent être exploités pour l'évaluation globale des dommages. L'approche locale donnera des résultats plus précis sur quelques secteurs et permettra d'évaluer les incertitudes de l'échelle régionale liées à la méthodologie et à la précision des données utilisées.

Bibliographie

Rahmstorf S. A., 2007, Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise; *Science*, Vol. 215, pp. 368-369.

Déqué et al. 2003, IMFREX ; Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations ; Rapport final

Stockdon H.F., Holman R.A., How P.A., Sallenger A.H. Jr. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and run-up. *Coastal Engineering*, 53, p. 573-588.

Observation vidéo continue du littoral: multi échelles et multi processus l'exemple de la côte aquitaine

Rafael, Almar[1], Nadia, Senechal[2], Philippe, Bonneton[3] et Jean-Paul, Parisot[4]

[1]PUC/Ingeniería, Santiago, Chile/ UMR EPOC, Talence, ralmar@ing.puc.cl
[2]UMR EPOC, Talence, n.senechal@epoc.u-bordeaux1.fr
[3] UMR EPOC, Talence, p.bonneton@epoc.u-bordeaux1.fr
[4] UMR EPOC, Talence, parisot@epoc.u-bordeaux1.fr

Abstract :
Coastal observation presented up to now shadows in diverse time scales. Permanent video systems largely solved this issue with a continuous and long term observation of both hydrodynamics and morphodynamics. We show the example of Biscarrosse beach (Landes) video system which detected an erosion tendency of the beach over the 2007-2009 period as well as large short term (day-week) variability. The results presented in this communication put forward the evident interest of using video systems for understanding beach dynamics and as a beach management tool.

Introduction
Le fonctionnement des plages de la côte aquitaine (Figure 1) a fait l'objet de nombreuses études (revue dans Castelle et al., 2007). Faisant office de référence, la plage du Truc Vert est par exemple suivie mensuellement depuis 1998 (Parisot et al., 2010), et plus intensivement durant les différentes campagnes de terrains réalisées. La télédétection satellite fournie en parallèle l'évolution grande échelle spatio-temporelle de la côte. Des observations ont montré que la plage de Biscarrosse possède un comportement similaire à celui du Truc Vert et plus généralement aux plages de la côte sableuse aquitaine (Almar et al., 2010). Cette plage présente une forte variabilité temporelle, et ce à différentes échelles. En plus de l'évolution à court terme (jour-semaine), des travaux d'imagerie satellite grande échelle ont par exemple montré une tendance interannuelle à l'érosion, et suggèrent un lien avec la dynamique sédimentaire de l'embouchure du Bassin d'Arcachon. Toutefois, en raison du manque d'information collectée à haute fréquence et de manière permanente, ni les causes, ni la dynamique de cette plage et en général de la côte aquitaine n'avaient pu être caractérisées.
Nous présentons dans cette communication une méthodologie basée sur l'imagerie vidéo permettant de suivre de manière continue l'évolution du littoral.

Système d'observation vidéo
Un système d'observation vidéo (Figure 2) a été installé, en avril 2007, sur la plage de Biscarosse. L'objectif était d'obtenir une base de données à la fois continue (i.e. haute fréquence) et à long terme. Des outils ont été développés pour mesurer les caractéristiques hydrodynamiques locales (trait de côte, vagues, dissipation énergétique, courants) et morphodynamiques (structures sableuses, bathymétrie littorale). La fréquence d'acquisition est de 2 Hz, les paramètres hydrodynamiques et morphodynamiques sont calculés toutes les 15 min et le champ de vue couvre environ 2 km de côte (Figure 2.d).

Résultats
Dynamique temporelle des structures sableuses

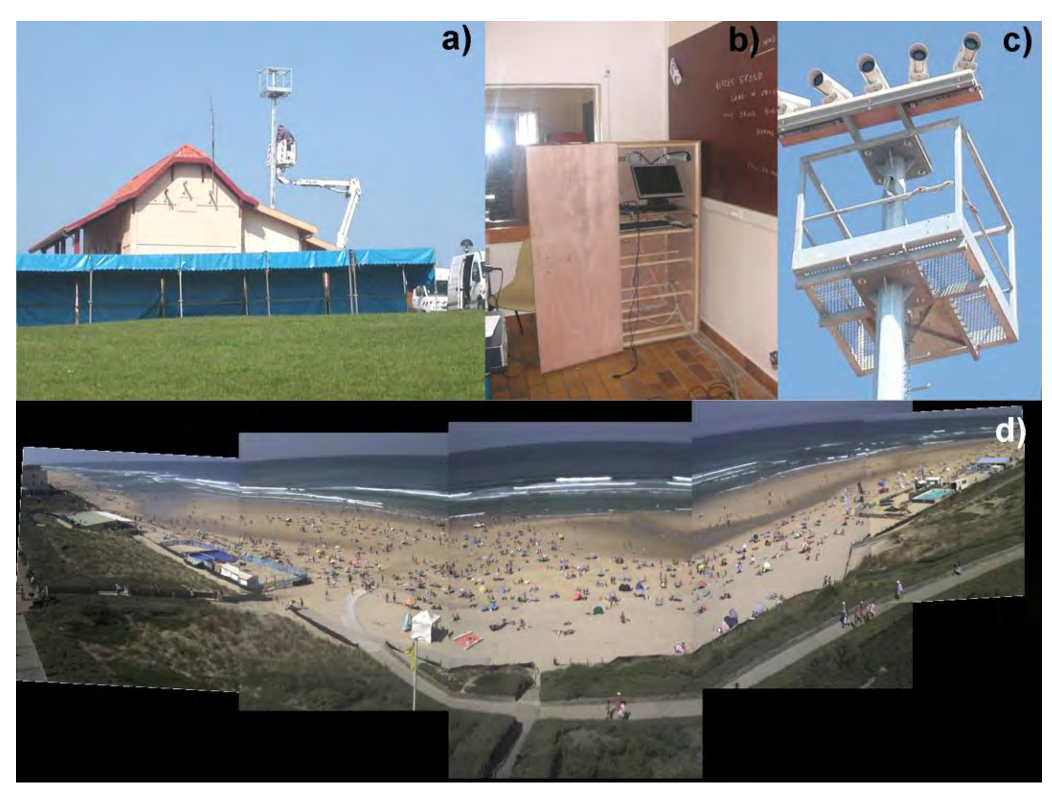


Figure 1 : Système vidéo de Biscarrosse (installation en avril 2007): (a) installation du mât au sommet duquel sont installées les caméras, (b) système local de traitement informatique hébergé dans le poste de secours (situé à moins de 20 m des caméras) et (c) vue des 5 caméras. (d) reconstitution du champ de vue du système vidéo à partir des images des 5 caméras.

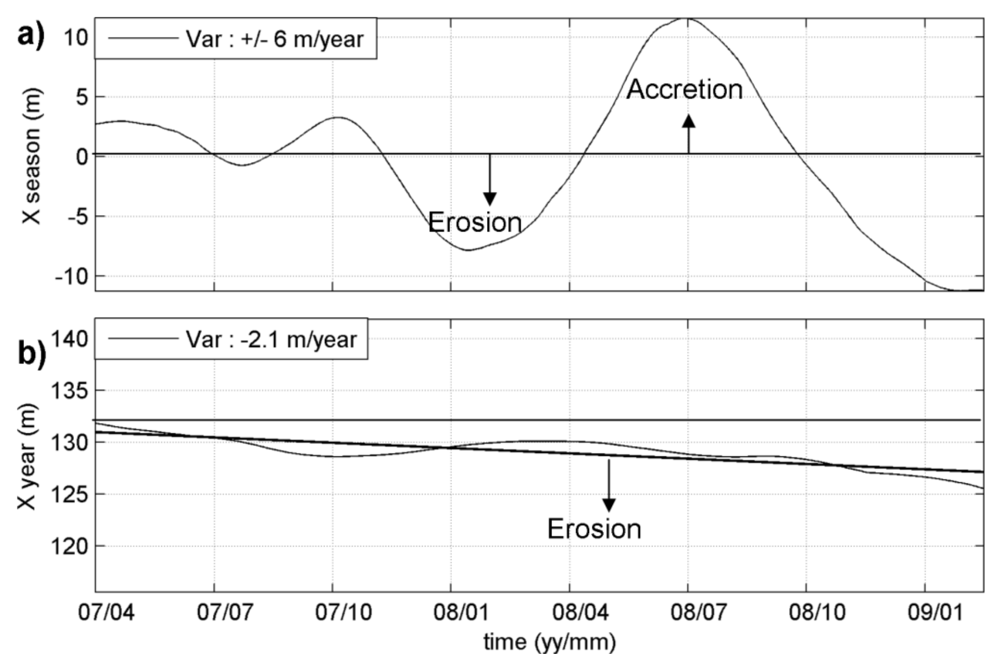


Figure 2 : Evolution temporelle de la position de la ligne d'eau (moyenne le long de la côte) à Biscarrosse sur la période 2007-2009. (a) évolution mensuelle et (b) tendance d'évolution pluriannuelle. Une variation positive signifie un engraissement de la plage, négative une érosion.

		Evénementiel (m/j)	Saisonnier (m/mois)	Annuel (m/an)
Ligne d'eau	**Max**	7	6	
	Moy	1	2.5	-2
Barre interne	**Max**	19	7	
	Moy	3	2	-10
Barre externe	**Max**	24	11	
	Moy	6	4	+3

Tableau 1 : variations maximales mesurées par composante temporelle pour la ligne d'eau, la barre interne et barre externe. Positif vers le large et négatif vers la côte.

Grâce à un suivi vidéo réalisé sur une courte période (mai-avril 2008), la vulnérabilité de la plage de Biscarrosse à l'impact des tempêtes avait été mise en évidence (Almar et al., 2009), les barres sableuses étant très mobiles.

Pour vérifier si ces résultats se retrouvent dans la dynamique long terme, l'évolution cross-shore de la position des barres et du trait de côte de la plage de Biscarosse est suivie sur une longue durée (2007 à 2009). Le signal est décomposé en évolution événementielle, saisonnière et pluriannuelle. Pour la composante événementielle, les taux moyens de migration augmentent entre la ligne d'eau (1 m/jour), la barre interne (3 m/jour) et la barre externe (6 m/jour) (Tableau 1). De même pour les maxima. Les barres, et en particulier la barre externe sont en effet les plus exposées aux évènements extrêmes, protégeant ainsi le haut de plage. Les ordres de grandeurs des migrations saisonnières sont importants et plus homogènes entre les différentes structures, soit 2-4 m/mois pour les moyennes et 6-11 pour les maximales. Ces résultats indiquent des cycles été-hiver marqués visibles sur la Figure 3.a. A l'échelle pluriannuelle, les différences de comportement sont notables. La tendance interannuelle observée au recul du trait de côte de -2 m par an confirme les résultats précédemment obtenus par imagerie satellite sur la même zone. La barre interne présente une forte migration vers la côte de -10 m/an. La barre externe ne migre que faiblement et au contraire vers le large. Deux explications à ces tendances sont possibles. Soit un ajustement de la plage à une variation du climat de vague (peu significative sur la période), soit l'influence d'un changement morphodynamique de grande échelle. Une précédente étude comparant les indices morphologiques et le forçage hydrodynamique (Almar et al. 2009) réalisée sur une courte période avait montré une corrélation entre le forçage hydrodynamique et la réponse de la plage plus faible à Biscarrosse (0.4) qu'a Truc Vert (0.6). Les résultats suggéraient alors un contrôle important de la morphodynamique grande échelle (Bassin d'Arcachon) sur l'évolution de la plage de Biscarrosse. Ceci pourrait en partie expliquer l'évolution long terme constatée qui n'est pas due à une modification du climat de vague.

Statistiques temporelles de la variabilité de la plage

La plage de Truc Vert est suivie par levée GPS mensuellement depuis 1997. Est-ce que cette fréquence d'échantillonnage est optimisée pour les échelles temporelles du système étudié ? Pour qualifier les besoins en terme de fréquence d'échantillonnage, la variabilité de la plage a été caractérisée pour différentes échelles de temps. Le tableau 2 présente la variabilité relative des structures morphologiques. Les résultats indiquent que la majorité de la variabilité (de 52 à 85 %) des différentes structures se situe à l'échelle événementielle. La composante saisonnière est également marquée (de 14 à 27 %) alors que les variations pluriannuelles ne représentent qu'une faible partie de la variabilité totale.

A partir de ces données vidéo continues d'évolution de la plage, nous avons pu déterminer l'incertitude associée à des mesures réalisées à une fréquence donnée (Figure 4). Pour chaque

	Evénementiel	Saisonnier	Annuel
Ligne d'eau	71 %	27 %	1 %
Barre interne	52 %	23 %	25 %
Barre externe	85 %	14 %	1 %

Tableau 3 : Importance relative (par rapport à la variabilité totale) des composantes (événementielle/saisonnière/annuelle) de variabilité temporelle de la position de structures morphologiques littorales: ligne d'eau, barre externe et barre externe.

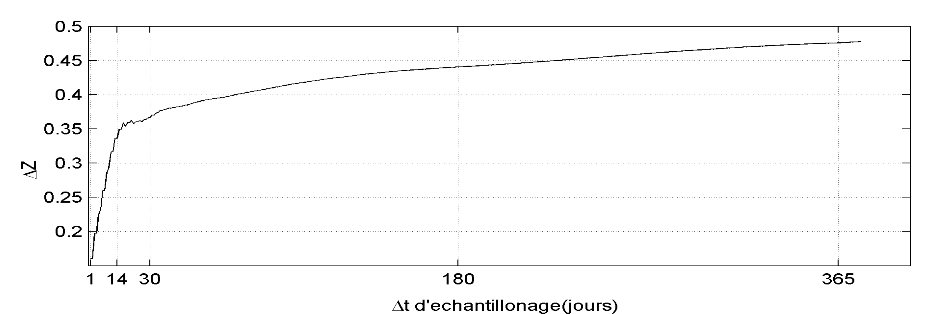


Figure 4 : Incertitude verticale (ΔZ) associée à une mesure ponctuelle réalisée fréquence d'échantillonnage donnée (Δt) calculée à partir du spectre temporel d'évolution de la ligne d'eau et pour une pente de plage constante de 0.03.

fréquence f_0 est calculée l'intégrale du signal associé aux fréquences supérieures à f_0 (signal non-résolu). L'incertitude obtenue (longueur horizontale) est ensuite rectifiée sur la verticale en considérant une pente de plage caractéristique de 0.03. La Figure 4 montre une augmentation rapide de l'incertitude pour les faibles périodes, indiquant clairement que la majorité du signal présente une période inférieure au mois (pic à 14 jours). Aussi l'incertitude associée à une observation mensuelle est de 37 cm. La courbe n'augmente ensuite que faiblement, montrant qu'une plus grande période d'échantillonnage n'aurait que peu de conséquences sur la description de l'évolution de la plage.

Conclusions

Dans un contexte d'évolution du littoral à l'échelle climatique, nous montrons l'intérêt des systèmes permanents d'observation vidéo. A partir de données continues et long terme peuvent être calculées les caractéristiques locales de vagues et de la dynamique de la plage. Nous donnons l'exemple du système vidéo de la plage de Biscarrosse (Landes) qui a permis de caractériser la variabilité temporelle de la plage. Une tendance à l'érosion (-2 m/an) a été observée sur la période 2007-2009 ainsi qu'une forte dynamique événementielle (période de 14 j). Ces résultats montrent clairement l'apport de la vidéo pour la compréhension de la dynamique et la gestion du littoral. Le développement d'un réseau d'observation vidéo est donc à envisager afin de suivre l'impact du changement climatique sur les côtes françaises.

References

-Almar, R., Castelle, B., Ruessink, G., Senechal, N., Bonneton, P., Marieu, V. (2009). High-frequency video observation of a double sandbar system under high-energy wave forcing, Journal of Coastal Research, SI56(2), 1706-1710.

-Castelle, B., Bonneton, P., Dupuis, H., Senechal, N. (2007). Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian coast: a review, Marine Geology, 245, 141-159.

-Parisot, J-P, Capo, S., Rihouey, D., Howa, H., Desmazes, F., Fauque, L. (2010). Analyse de l'évolution morphodynamique de la plage du Truc Vert (Gironde) sur une période décennale. Comptes rendus de Génie Côtier Génie Civil, Les Sables d'Olonne.

THEME 3

Implications socio-économiques

Changement climatique et évaluation des risques côtiers en Afrique du Nord

Yves Ennesser[1], Dominique Cataliotti[2] et Monique Terrier[2]

[1]Egis BCEOM International, 78 allée John Napier, 34965 Montpellier Cedex 2, yves.ennesser@egis.fr
[2]Egis Eau, 78 allée John Napier, 34965 Montpellier Cedex 2, dominique.cataliotti@egis.fr
[2]BRGM, 3 avenue C. Guillemin, 45060 Orléans Cedex 2, m.terrier@brgm.fr

Abstract :
Coastal cities of Middle East and North Africa (MENA), which in 2000 were the home to over 60 million people and are expected to grow to 100 million by 2030, stand out as the most productive cities in the region, but also as the most directly affected by climate change impacts. For example, according to some experts, MENA will be the second developing region most affected by sea level rise (SLR) in the world. In this context, the World Bank launched a study addressing the vulnerability and adaptation to climate change of Alexandria, Casablanca and Tunis, as well as of the Bouregreg Valley in Morocco, for the 2030 horizon. A complementary study also addressed long term effects (2100) of SLR at Zenata (Casablanca region). The first results of these studies, carried out by Egis BCEOM International, IAU-IDF and BRGM, are presented and discussed in this paper.
Three types of coastal natural risks are assessed and compared on each site: erosion, storm surge related submersion, and tsunami related submersion. Based on diachronic analyses of past evolutions and simulations using digital elevation models, quantitative estimates of coastal stretches and urban surface areas under concern can be provided. Despite numerous uncertainties (first and foremost regarding SLR values) and methodological shortcomings, these pilot studies make possible raising awareness and understanding of local stakeholders on urban planning needs.

Introduction

Les villes côtières d'Afrique du Nord et du Moyen Orient accueillent aujourd'hui plus de 60 millions de personnes et en abriteront environ 100 millions en 2030. Ces mégalopoles sont à la fois les agglomérations les plus productives et celles qui vont être les plus touchées par les impacts du changement climatique, notamment du fait de leur caractère côtier. D'après certains experts, cette région sera la deuxième zone géographique au monde la plus affectée par l'élévation accélérée du niveau de la mer (EANM).

Egis BCEOM International, IAU-IDF et BRGM collaborent à une étude pilote financée par la Banque Mondiale destinée à évaluer l'état actuel de préparation aux désastres naturels et au changement climatique de trois grandes villes d'Afrique du Nord : Alexandrie, Tunis, Casablanca (et la vallée du Bouregreg à Rabat). La phase de diagnostic, récemment achevée, a permis de préciser les niveaux de risque d'érosion et de submersion du littoral en situation actuelle et à l'horizon 2030. Une étude complémentaire menée par Egis Eau à une échelle plus détaillée sur le secteur de Zenata (région de Casablanca) a également permis de travailler à l'horizon 2100. L'analyse a été complétée par une évaluation du risque de tsunami.

Sont présentés ci-après les principaux éléments de la démarche méthodologique et les résultats obtenus sur les sites les plus représentatifs.

Une approche méthodologique adaptée à l'échelle et aux incertitudes de l'étude

Sur des linéaires côtiers de plusieurs dizaines de kilomètres (une centaine dans le cas de l'agglomération d'Alexandrie), il a été nécessaire de développer une méthode d'analyse et de simulation des risques simple et robuste. En ce qui concerne la problématique d'érosion côtière, outre les quelques études réalisées localement, la démarche s'est essentiellement appuyée sur une analyse diachronique de photographies aériennes verticales sur support papier (planches contacts) noir et blanc. Sur le littoral de Tunis, les résultats de quatre missions photographiques ont ainsi été utilisés, pour retracer l'évolution du littoral de 1948 à nos jours.

Les problèmes de submersion marine n'ayant fait l'objet d'aucune étude sur l'ensemble des zones urbaines concernées, l'analyse a d'abord consisté à caractériser les surcotes marines à caractère exceptionnel. L'examen de la littérature et des entretiens auprès des autorités portuaires et maritimes ont permis de définir les caractéristiques des principales tempêtes ayant affecté le littoral ces dernières décennies. Pour les quatre sites étudiés, il a été possible de caractériser des évènements proches de la fréquence cinquantennale. L'impact des surcotes correspondantes en termes de submersion a été ensuite estimé à l'aide de modèles numériques de terrain (MNT). Ces MNT ont été construits par compilation des différentes données topographiques disponibles au format numérique. Ont notamment été utilisés les relevés topographiques réalisés dans le cadre de l'étude sur les conditions d'inondation du Grand Tunis (BCEOM-SIRUS, 2005), et ceux relatifs au Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme du Grand Casablanca (IAU-IDF, 2006). Leur précision est évaluée à environ 10 cm sur l'axe vertical. Soulignons que l'échelle géographique de l'étude et les moyens disponibles n'ont pas permis d'effectuer des vérifications sur le terrain. Sont donc identifiées les zones « potentiellement » submersibles, sans préjuger de la plupart des obstacles naturels ou artificiels (ex. : remblai routier) susceptibles de protéger certains secteurs. Les principales digues de protection ont néanmoins été prises en compte.

L'élévation accélérée du niveau marin (EANM) aux horizons 2030 et 2100 a été estimée à partir d'une analyse exhaustive de la littérature scientifique récente sur le sujet. Les positions controversées du 4ème rapport du GIEC ont été confrontées aux projections plus pessimistes de certains auteurs. Une analyse par bassin a été réalisée, notamment pour essayer d'affiner les projections sur la zone méditerranéenne. Notons qu'il n'a pas été jugé souhaitable d'utiliser les enregistrements marégraphiques locaux pour définir des tendances, du fait du faible nombre d'années d'observations disponibles et/ou de la mise en évidence de phénomènes de subsidence relativement forts. L'impact de l'élévation du niveau marin sur les surcotes a été évalué. La prise en compte de l'EANM sur les phénomènes d'érosion a été essentiellement qualitative, la précision relative des MNT sur la frange littorale et l'absence de relevés bathymétriques ne permettant pas de quantifier son impact. La sensibilité naturelle du littoral (notamment la largeur et la pente du lido sableux), les ouvrages de protection existants ou projetés, et les enjeux de protection (front urbain dense actuel ou projeté, zone naturelle protégée, …) ont néanmoins été intégrés dans l'analyse pour proposer une cartographie selon trois classes de risques. Pour la submersion, la cartographie globale du risque a été complétée par des simulations de hauteurs d'eau sous SIG.

Les risques générés par les phénomènes climatiques ont été complétés par ceux d'origine sismique, notamment par l'interprétation d'un scénario de tsunami possible dans les 20 ans et susceptible d'affecter les sites étudiés. L'évaluation est basée sur la compilation et l'analyse des bases de données évènementielles, ainsi que sur la publication de résultats de simulations

de séismes fictifs, localisés au niveau des zones tsunamigéniques susceptibles d'intéresser les secteurs côtiers étudiés. Une comparaison directe avec les submersions d'origine météorologique n'a cependant pas été possible, en l'absence de relevés bathymétriques suffisamment fins pour pouvoir simuler les conditions de propagation des tsunamis.

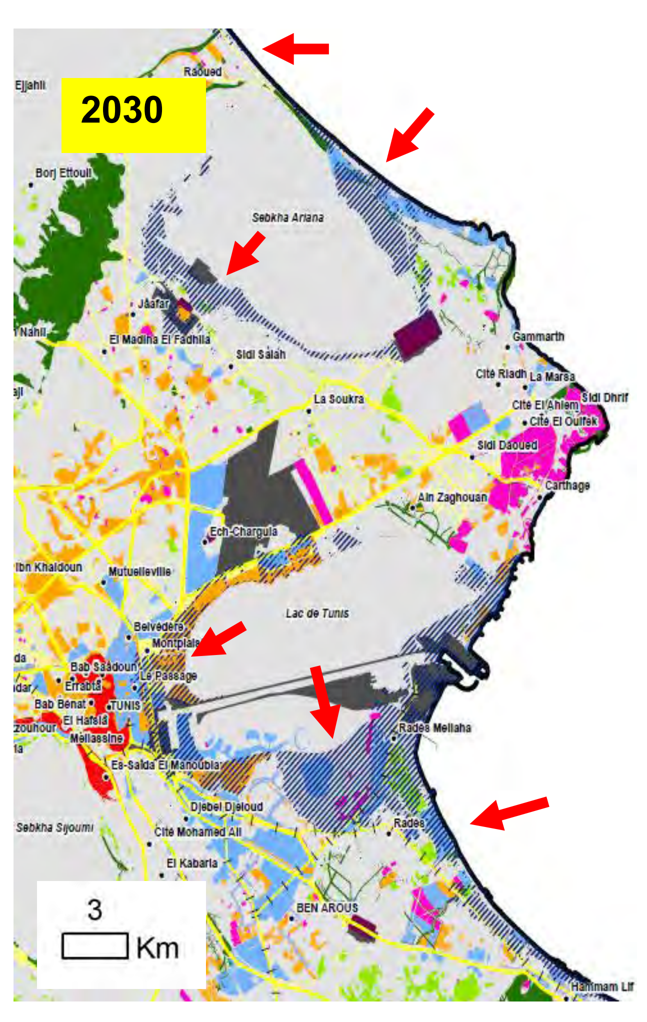
Des résultats destinés à sensibiliser les acteurs locaux

Sont présentés ci-après quelques exemples de résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Ils témoignent de la volonté d'attirer l'attention des autorités locales sur les risques et les vulnérabilités des zones côtières urbaines dans le contexte de changement climatique. Ils doivent bien entendu être considérés comme une première approche du problème, vouée à être complétée et affinée par la suite. D'ores et déjà, ces résultats sont discutés avec les responsables locaux d'aménagement du territoire pour la définition de plans d'actions, afin de réduire l'impact des changements climatiques dans les 20 ans et 50 ans à venir.

Tunis : un risque fort d'érosion pour 16 km de linéaire côtier en situation actuelle, 27 km en 2030, du fait de l'élévation du niveau marin (+ 20 cm), mais surtout de l'urbanisation du littoral.

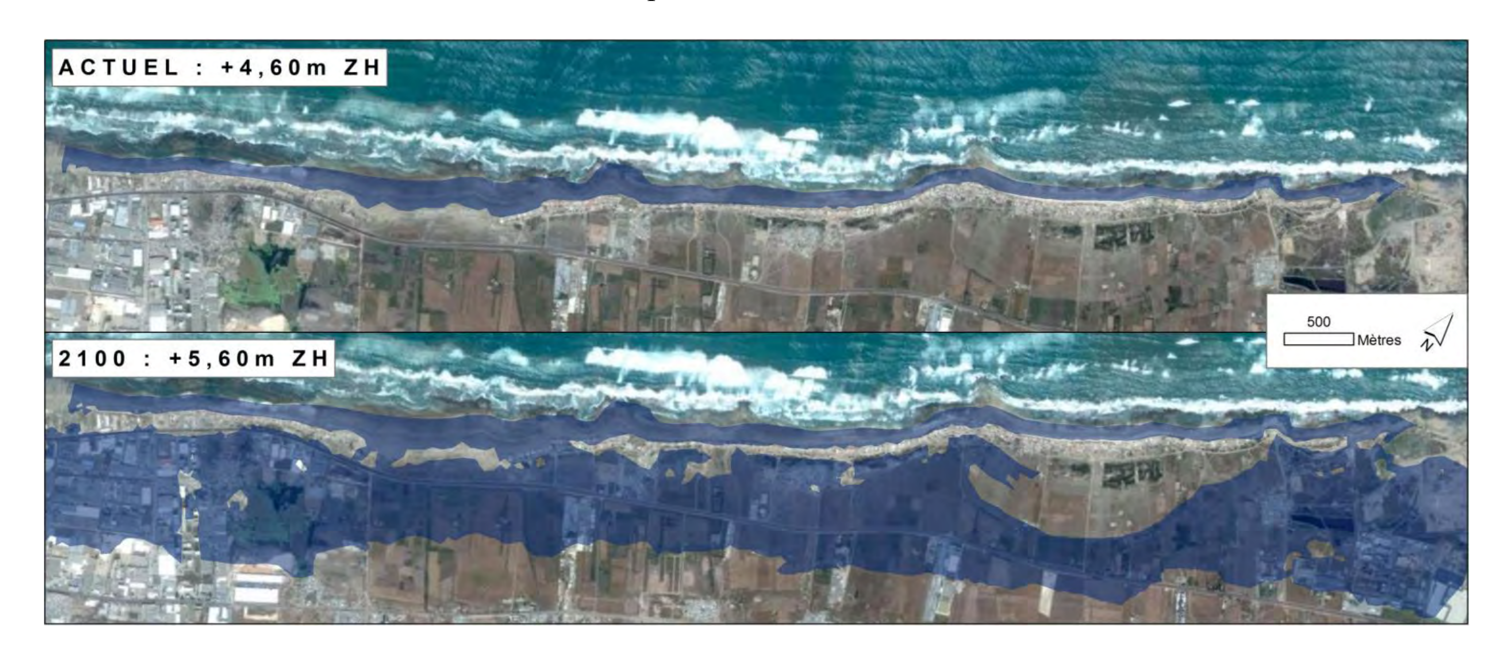
Un risque important de submersion marine sur l'ensemble du littoral, mais aussi en bordure du Lac de Tunis et des sebkhas Sejoumi et Ariana.





Ci-contre, les zones hachurées représentent les 5 500 hectares de surfaces potentiellement submersibles par une surcote marine de fréquence cinquantennale à l'horizon 2030 (1,34 m NGT). Les flèches rouges représentent les secteurs sur lesquels le risque de submersion augmente le plus. Les principales vulnérabilités urbaines (enjeux) sont représentées par un code couleur.

Zenata (région de Casablanca) : en situation actuelle, même pour une surcote marine exceptionnelle (+ 4,60 m ZH), seule la plage est submergée. A l'horizon 2100, en tenant compte d'une élévation de 1 m du niveau d'eau, le même évènement submerge en plusieurs endroits le massif dunaire et inonde les points bas situés en retrait.



Le littoral marocain atlantique est exposé au risque de tsunami, du fait de la proximité de la zone de contact des plaques tectoniques européennes et africaines. Le tsunami du 28 février 1969, estimé à une période de retour 200 ans, a généré une vague d'environ 1 m à hauteur de Casablanca. En situation de marée haute, un tel tsunami pourrait générer des hauteurs de submersion comparables à celles d'une tempête de fréquence cinquantennale (hors run-up).

Conclusion

La présente étude apporte des résultats concrets en termes d'évaluation des risques côtiers dans un contexte de changement climatique, pour un horizon opérationnel en phase avec les programmes d'urbanisme (2030) et un horizon stratégique de planification à long terme (2100). Elle montre ainsi que d'ici 2030, par rapport à la situation actuelle, les surfaces submergées pour une tempête de fréquence cinquantennale et le linéaire côtier à fort risque d'érosion pourraient respectivement augmenter de 22 % et 70 % sur Tunis. L'évaluation économique de ces risques débouche sur un coût moyen annuel non négligeable d'environ 20 millions de Dinars à l'horizon 2030 (soit environ 0,04 % du PIB du Grand Tunis), dont 22 % imputable au changement climatique. Sur le secteur de Zenata (région de Casablanca), le risque de submersion côtière, encore faible à l'horizon 2030, pourrait devenir critique d'ici la fin du siècle.

Soulignons qu'il s'agit d'une étude à caractère exploratoire : première étude de ce type dans les pays d'Afrique du Nord, évaluation à deux horizons différents (opérationnel et stratégique), approche combinée risque climatique et risque sismique (tsunami), etc. Même si cette étude présente de nombreuses incertitudes, à commencer par les hypothèses d'élévation du niveau marin, elle permet néanmoins de prendre conscience des enjeux de maîtrise de l'urbanisation en zone côtière et constitue un outil d'aide à la décision pour les acteurs du territoire.

ASSESSMENT OF DAMAGE FROM STORM SURGE AND SEA LEVEL RISE TO COASTAL CITIES: LESSONS FROM THE MIAMI AREA

Elisabetta, Genovese[1], Stéphane, Hallegatte[2] et Patrice, Dumas[3]

[1]genovese@centre-cired.fr
[2]hallegatte@centre-cired.fr
[3]dumas@centre-cired.fr

Abstract:
Coastal cities are growing at a very rapid pace, both in population and in terms of assets, therefore flood exposure will increase substantially in these areas in the absence of specific protections such as dikes and seawalls. In addition, great uncertainty surrounds the future evolution of hurricane intensity. The area of Miami represents a clear hotspot of human and economic coastal flood exposure: there are more than 5 million inhabitants in the Miami metropolitan area and population is growing. It is also a low lying city, with most of the population living below an elevation of 10m, and is located in a region where tropical cyclones hit frequently. The present study is focused on the two contiguous counties of Miami Dade and Broward. In this analysis we consider the impact of different storm surges predicted by the computerized model Slosh[1] and investigate sea level rise considering different hurricane parameters (storm category and direction, wind speed, and tide level). For each impact, we apply a damage function and determine if the considered storm surges potentially lead to definitive asset loss, considering both properties and their contents. The results show that, in absence of protections, losses will be very high for large sea level rises, reaching up to tens of billions USD. In the second part of the analysis, we demonstrate how the economic impact changes when protections are built up, considering different dikes heights. We conclude that to raise flood defences is urgently required, since the consequences of a storm surge could be enormous.

Introduction

In coastal cities, the product of an interaction between climatic, socio-economic and institutional aspects is increasing the risk of big damage losses and it is suitable to reduce future risks through targeted territorial development plans. This study proposes the case of the Miami area illustrating a methodology to assess coastal flood risks from storm surge in urban areas. Since 1990, Florida has been struck directly by 22 tropical storms and hurricanes. Moreover, 40% of Florida's beaches were listed as critically eroded. Despite the big amount of money invested by the state in beach nourishment, our study suggests that it does not provide adequate benefits in the form of storm damage reduction on structures and infrastructures. The area of Miami represents a hotspot of human and economic coastal flood exposure (Herweijer et al., 2008). It is one of the port cities with the highest exposure and vulnerability to climate extremes in the world, assuming a mean sea level rise of 0.5 meters by 2070 (Nicholls et al., 2007). When considering its high exposure, the city has surprisingly a very low level of protection, with no comprehensive seawall or dam system to protect the city from storm surges.

This paper describes the impacts of water-related risks, specifically in the Miami Dade and Broward counties, with the aim to establish an overall cost-estimate of potential damage. In the first part of this study, we analyse storm surge losses considering different hurricanes

[1] http://www.nhc.noaa.gov/HAW2/english/surge/slosh.shtml

intensities and directions, according to the result of the model Slosh. We assess the direct losses according to the economic values of insured properties provided us by Risk Management Solution (RMS). This analysis is used to determine the benefits from protection as a function of different storm surges. Finally, we determine the consequences of an adaptation strategy starting from the current condition and then analyse how the loss prospective can change when protections are added.

Flood losses analysis in absence of protection

As a first step, we propose an assessment of the exposure in absence of flood protection in the Biscayne Bay. Slosh (Sea, Lake, and Overland Surge from Hurricanes) is a computerized model developed by the American National Weather Service (NWS) with the aim to estimate storm surge heights and winds resulting from historical, hypothetical, or predicted hurricanes[2]. It calculates water surface elevations caused by storm surge in specific basins and gives as a result different MEOW (Maximum Envelope of Water), which refers to the maximum the water reaches at every grid cell for a given hypothetical storm.

The Slosh database exists for the Biscayne Bay for four different directions of the hurricane tracks: North, East, North-East and East/North-East. Five hurricane ―Categories" (between 1 and 5) and ―Speed" (5, 15, and 25 mph) are presented for these directions. We extracted the results in a shapefile format for different storm direction in case of weak (Category 1), medium (Category 3) or strong (Category 5) storm surge.

Maximum water levels of 3.3 up to 3.9m can be reached in case of a category 1 storm (depending on the wind direction), of 7.5m up to 8.7m for a Category 3, and even from 11.5m up to 15.8m in the extreme event of a Category 5 storm. By an overlay of these results and the insured value of residential, industrial and commercial area, visualized on a GIS, we determined which current insured built-up areas are at risk of storm surge and estimated the economic value of the entire assets that are flooded by each storm surge category. The economic results we obtained were weighted on a damage function related to water heights.

Damage function

The damage functions is an increasing functions: as the inundation depth grows, also damage rises. We considered the direct costs, so what refers to physical damage to capital assets and inventories, valued at same-standard replacement costs (Genovese, 2006). At this stage we do not consider indirect losses, such as business interruption, environmental damage, and evacuation costs. Among the damage functions available in the literature, we chose the one developed by the OECD for the area of Copenhagen (Hallegatte et al., 2008). Buildings are divided in insurance classes, each with their own stage damage curve based on the type of asset (residential, commercial and industrial). The contents and building costs has to be calculated separately since contents are evaluated as completely destroyed with at water level that is considerably lower than the one we consider for the buildings themselves.

The direct losses we obtained as a result are amounting to several billions of USD. In the first example, we illustrate that storms having East direction, in the current economic and land use situation, would cause direct losses to contents amounting to about 5 to 15 billion USD for residential structures, 5 to 9 billion for commercial structures, and USD 5 to 7 billion for industrial structures (depending on storm category). For the buildings, it would cost about 3 to 10 billion USD for residential structures, 6 to 11 billion for commercial structures, and 2 to 3 billion USD for industrial structures. In the second example, for a storm with a North-East direction, the monetary results are higher, especially for residential structures.

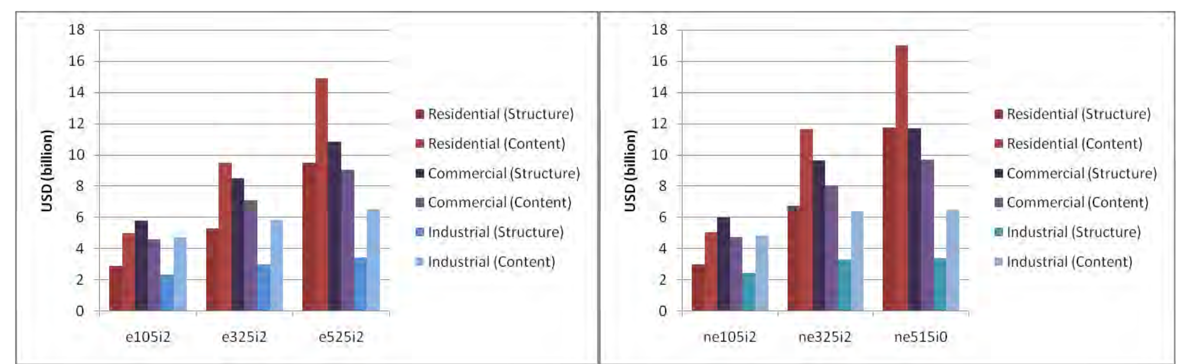


Figure 1: Direct damage (USD) estimation in Biscayne Bay for storm surge heading East and North-East, calculated for Categories 1, 3 and 5 for contents and structures.

Non insured assets

Non-insured assets, such as public infrastructure, are not included in the available data. We referred to past studies in order to find a best guess estimates and we used the consequences of the Katrina landfall in New Orleans to help assessing infrastructure losses, such as in the OECD report (Hallegatte et al., 2008). The OEDC concludes that uninsured losses represent about 40% of insured losses. Therefore, all the previous outcomes needed to be increases of 40%, leading to very massive losses. For a storm with East direction, total losses (building plus contents) are between a minimum loss of USD 34 billion for a Category 1 storm (e105i2) and USD 72 billion for a Category 5 storm (e525i2). Because of the damage function we chose, we assume that our damage evaluation is probably overestimated, especially when considering the areas on the beach front (where most of the buildings are skyscrapers).

Assessing risk reduction measures

The final step of our analysis is the evaluation of the potential damage when hypothetical protections are built. We can theorize that the cost of building a seawall can be of approximately USD 5.300 per linear foot (in year 2000), that is about USD 1.600 per meter (Heberger et al, 2000). About 200 km long coast will need to be protected and therefore we estimate that the cost of constructing a coastal flood protection can be lower than 1 billion dollars. We made four different basic assumptions, hypothesizing the following scenarios of intervention.

Unchanged protection: In absence of protection, a storm surge will lead to losses between 35 billion up to 186 billion USD for a Category 5 storm. It can be assumed that some natural or artificial protections, of which we are not aware of, probably already exists, therefore this result has to be considered as an overestimation.

2 meters protections: We subtracted 2 meters to all the values. All the water levels from 0 to 2 meters became equal to 0. Most of the damage, both in structures and contents, is concentrated before the 2 meters water level. For example, a storm surge of Category 1 heading East has a residual damage of only 15 and 13% of residential building and between 8 and 1% for the commercial and industrial ones. Therefore we affirm that a 2 meters protection could be suitable in case of smaller events, able for example to save the 35 billion USD of damage caused by a Category 1 storm heading East, but do not offer an adequate protection for events of major dimension.

5 meters protections: A 5 meters dam completely protects from all Category 1 storm surges. We calculated that, with a protection of 5 meters, a storm surge of Category 3 heading East has a residual damage of 28% for residential buildings, 24% for the commercial buildings and 17% for the industrial ones. This partial overflowing could possibly be contained with further flood control structures and defences (e.g. successive dike rings), drainage infrastructure and beach nourishment interventions.

Completely maintaining flood risk: In case of a Category 5 storm, reaching water levels higher than 10 meters, a 10m protection will be probably inadequate. In fact, very high dams would completely eliminate the visual and physical access to beaches. Moreover, in general a hardfill dam requires a basement which is three times the height of the dam itself (ICOLD, 1992). This means that a very high dam would require an enormous quantity of space on the beach. This solution appears not to be conceivable in an area where tourist attractiveness is the base of the local economic system. Anyway, since about 30 percent of ocean beaches in Florida would probably disappear because of sea level rise before 2100 (Harrington and Walton, 2008), turism is at risk anyway. Therefore the impact of protections on the touristic sector can be twofold and has to be carefully investigated.

Conclusions

The area of Miami is extremely vulnerable in the current situation and it is still impossible today to predict precisely how rapidly sea levels will rise and how hurricane frequency and strength will change, but this risk is likely to increase in the future. Without institutions able to carry out a wide-ranging risk management framework, this risk increase may translate into larger disasters. The study demonstrates that to take action and to raise flood defenses is urgently required. Of course, building dams on the beach front may have negative aesthetic effects, and may potentially impact on city attractiveness. Even once built, appropriate protective measures, protections have to be maintained rigorously. Additionally, the design of future protection has to take into account future sea level rise projections due to climate change. The present analysis has several caveats which have to be highlighted. In particular, the damage function has not specifically built for this region, flood defences have not been explicitly modelled and the consequences of an overflow are not represented in any detail. As a consequence, much more work on the vulnerability of Miami is needed, and will be carried out in a follow-up study.

Acknowledgements

We would like to thank Auguste Boissonnade and Robert Muir-Wood from RMS and Edida Rajesh from RMSI for providing us the economic data on asset exposure, and Nicola Ranger from LSE for her advices on vulnerability curves.

References

- Genovese E. (2006). A methodological approach to land use-based flood damage assessment in urban areas: Prague case study, Technical EUR Reports, EUR 22497 EN.
- Hallegatte S., N. Patmore, O. Mestre, P. Dumas, J. Corfee Morlot, C. Herweijer, R. Muir Wood (2008). Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: A Case Study on Copenhagen, OECD Environment Working Paper No. 3.
- Harrington J., and Walton T. L. (2008). Climate change in coastal area in Florida: sea level rise estimation and economic analysis to year 2080, Florida State University report.
- Heberger M., H. Cooley, P. Herrera, P. H. Gleick, E. Moore (2009). The impacts of sea-level rise on the California coast, California Climate Change Center, Pacific Institute.
- Herweijer C, Nicholls R. J., Hanson S, Patmore N, Hallegatte S, Corfee-Morlot J, Chateau J, Muir-Wood R (2008). "How do our coastal cities fare under rising flood risk?", Catastrophe Risk Management, April, 12-13.
- ICOLD (1992). Cost Impact on Future Dam Design - Analysis and Proposals, ICOLD publications, No. 83.
- Nicholls, R.J., S. Hanson, C. Herweijer, N. Patmore, S. Hallegatte, J. Corfee-Morlot, J. Chateau, and R. Muir-Wood (2007). Screening Study: Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes, OECD Working Paper.

Construction et protection de l'environnement des communautés littorales du Centre-Ouest atlantique : l'apport de la géohistoire.

Thierry, SAUZEAU[1], Jacques, PERET[2]

[1] thierry.sauzeau@univ-poitiers.fr
[2] jacques.peret@univ-poitiers.fr

Abstract :

Les littoraux d'entre Loire et Gironde sont dominés par les côtes basses. Les estrans vastes y sont le plus souvent vaseux et sableux. Leur mobilité aux temps géologiques et historiques reste d'actualité[3]. Alimentée par les sédiments charriés par plusieurs fleuves côtiers, elle s'appuie aussi sur une courantologie côtière, compliquée par la présence d'îles et de passages (les pertuis) mais aussi de baies et de pointes. Ces conditions naturelles ont décidé du colmatage des golfes anciens qui parsemaient le littoral du Centre-Ouest. La citadelle de Brouage, désormais située à plusieurs kilomètres de la mer qui baignait ses murs au début du XVIIe siècle, en constitue un vivant témoignage[4]. Partout, l'homme a contribué par ses activités à hâter, diriger et protéger l'évolution de cet environnement très particulier. Le paysage de marais, né de plusieurs vagues d'entreprise d'aménagement du littoral, est l'autre élément majeur de la construction de l'environnement littoral.

La saline a supporté l'activité pionnière de cette colonisation de la terre sur la mer. Dès le Moyen âge, les abbayes se sont lancées dans une véritable « course à la mer » pour mettre la main sur le sel, ressource et monnaie d'échange[5]. Devenus marais « gâts » et dédiés à l'élevage extensif, reconvertis en marais ostréicoles et même parfois maintenus à l'état de marais salants, les « prises » des marais saintongeais[6] ou de la Baie (de Bourgneuf)[7] abritent des formes tout à fait originales du mode de vie et de travail des populations littorales.

A peu près contemporains des grands aménagements salicoles, les assèchements réalisés par l'érection de digues, de canaux de drainage et de clapets (appelés aboiteaux ou varaignes) ont donné naissance aux marais agricoles. Deux générations de ces paysages sont identifiables en Centre-Ouest. Elles sont réunies dans le Marais Poitevin autour de l'opposition marais mouillés / marais desséché[8]. Le marais mouillé, aménagé au Moyen-âge, est une bonification de zones anciennes de marécages, inondées par les eaux de ruissèlement des bassins versants. C'est un territoire rendu cultivable par un réseau hydrographique de drainage. Le marais desséché le prolonge en aval, face à la mer dont il est une conquête. Il a été aménagé depuis les Ordonnances de Henri IV et l'intervention hollandaise. Ces paysages ont vécu d'intenses bouleversements au XXe siècle mais c'est le marais mouillé qui en fait les frais de la manière la plus sévère. Privé d'eau par le développement de la maïsiculture

[3] CHAUMILLON (Eric), WEBER (N.), "Spatial variability of modern incised valleys on the French Atlantic coast: Comparison between the Charente (Pertuis d'Antioche) and the Lay-Sèvre (Pertuis Breton) incised-valleys", in SEPM Special publication, *Incised Valleys in Time and Space*, n°85, edited by: Robert W. Dalrymple, Dale A. Leckie, and Roderick W. Tillman, 2006, p.57-85.
[4] SAUZEAU (Thierry), *Petite histoire de Brouage*, La Crèche, Geste Editions, 2008, 115 p.
[5] TREFFORT (Cécile), « Moines, monastères et prieurés charentais au moyen âge », dans Pichot (Daniel) et Mazel (Florian), *Prieurés et société au moyen âge*, Annales des Pays de Bretagne et de l'Ouest, tome 113, année 2006, n°3, PUR., Rennes, 2006.
[6] MILLE-REAULT (Sarah), *Les marais charentais, géohistoire des paysages du sel*, Rennes, PUR., 2003,
[7] HOCQUET (Jean-Claude) et SARRAZIN (Jean-Luc) dir., *Le sel de la baie. Histoire, archéologie, ethnologie des sels atlantiques*, PUR., Rennes, 2006, 411p.
[8] SUIRE (Yannis), *Le Marais poitevin, une écohistoire du XVIe siècle à l'aube du XXe siècle*, Centre vendéen de recherches historiques, 2006, 535 p.

intensive sur les plateaux qui l'encadrent, ce paysage se voit également vidé de sa ressource par les céréaliers qui ont mis en valeur les marais desséchés, en aval. En amont et en aval, chacun utilise l'hydraulique à son avantage, au détriment du marais mouillé dont les activités de loisir souffrent de l'étiage prolongé et forcé que connait chaque été la « Venise verte ». De plus, la déprise rurale a entraîné le passage d'une économie d'élevage et de jardinage vers une production de bois pour l'industrie (peupliers) particulièrement gourmande en eau.

Le tableau ne serait pas complet sans l'évocation des assèchements littoraux intervenus au XIXe siècle, sur le littoral de la Vendée et de la Charente Maritime. Ils ont donné naissance à des polders tournés vers l'exportation de vin, de pommes de terre, de fruits, avant que le tourisme balnéaire ne s'en empare après 1960[9]. Enfin, les îles et presqu'îles charentaises détiennent un certain nombre de marais doux, dépressions jadis envahies par le flux et le reflux mais coupés de l'océan par cordons dunaires, aux temps historiques. Idéalement situés à portée des plages, ces zones humides sont désormais loties à grand coup de remblai, sans égard pour les risques nés de l'exposition de leur rempart de dune à l'érosion de la houle d'ouest[10].

Certes, à l'abri des îles charentaises, la mer des Pertuis est habituellement préservée des colères de l'Océan. Les qualités de cet abri maritime sont connues depuis l'Antiquité. Cette mer intérieure était le « Portus Santonum » des Romains avant de devenir le « Havre de Brouage » des flottes du sel venues de la Hanse ou de Hollande. Aussi la vie s'est-elle depuis longtemps épanouie sur ses rivages, entre la baie de l'Aiguillon et l'estuaire de la Seudre, comme sur les côtes sous le vent (dominant, d'ouest) des îles Charentaises. C'est dans ce contexte que le réseau urbain s'est enraciné, avant les renforts de la vogue balnéaire et de la littoralisation des résidences périurbaines. Sur les littoraux du Centre-Ouest atlantique, ces vagues successives d'aménagement du littoral (salines, assèchements, drainage) ont fait naître des paysages variés (marais mouillés et desséchés, polders). Ils sont devenus plus attractifs à mesure que l'héliotropisme et la littoralisation se sont emparés des sociétés contemporaines.

Dans la nuit du 27 au 28 février 2010, c'est là que Xynthia a frappé d'une manière dramatique. C'est que le littoral a dû encaisser un triple impact simultané[11] : la pleine mer d'une classique marée d'équinoxe, le pic d'une banale tempête hivernale, accompagné d'un fort creux barométrique dépressionnaire. Cette addition a provoqué une forte surcote de marée. Le phénomène est connu. Des marégraphes l'enregistrent depuis le début du XVIIIe siècle. Il consiste en un dépassement, à marée haute, de la cote calculée et publiée dans les annuaires[12]. Le risque d'une surcote de marée d'équinoxe, c'est la submersion, dont les riverains gardent en mémoire les épisodes de 1957, 1941 et 1940. Les archives recèlent bien d'autres dates[13] : l'histoire de la mer des Pertuis en est jalonnée. En dépit de la récurrence de tels événements, les submersions n'ont jamais interrompu le développement des territoires côtiers, des villages littoraux et les activités de leurs habitants. Un exemple parmi d'autres est fourni par la façade continentale de l'île d'Oléron, avec le village de La Perrotine. Situé sur la

---

[9] SAUZEAU (Thierry), « La Perrotine, un village oléronais face au risque de submersion marine », dans Garnier (Emmanuel) dir., *La crise Xynthia à l'aune de l'histoire : enseignements et enjeux contemporains d'une histoire des submersions,* La Rochelle, 112p., op.cit.p.91-93.p.

[10] Duvat (Virginie), *Les impacts de la tempête Xynthia sur les plages de l'île d'Oléron : les réalités du terrain, Rapport*, mars 2010, 27p. http://lienss.univ-larochelle.fr/IMG/pdf/RapportXynthiaOleron2.pdf

[11] http://france.meteofrance.com/france/actu/actu?portlet_id=50150&document_id=22089 (consulté le 21 juin 2010).

[12] POUVREAU (Nicolas), *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*, thèse de doctorat en géophysique, La Rochelle, 2008, 474p.

[13] GARNIER (Emmanuel), « Historique des risques de submersions marines pour les littoraux français », journée *Vigilance et alerte « risques tsunamis et submersions marines »,* juin 2010, Institut National de Maîtrise des Risques (IMdR) et Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (AFPCN).

rive droite d'un chenal, il est au débouché d'une zone de marais salants anciens (35km²). Dans cette contexte, le 28 février 2010 à 4h30 (pleine mer), le niveau de l'eau a atteint 4,00m à 4,20m[14]. A titre de comparaison, le 15 février 1957 à La Rochelle on atteignait 4,00m à 4,30m, avec des vents plus violents encore[15]. Si les deux évènements semblent d'intensité comparable, les conséquences n'ont pas du tout été les mêmes. Ni en 1957, ni lors des submersions précédentes, les décideurs n'ont préconisé de mettre fin à trois siècles d'occupation humaine, ni à La Perrotine, ni ailleurs. Il faut donc prendre acte du fait que Xynthia, après Klaus et Martin, a reformulé la question du risque côtier. Face à la submersion, l'action publique traumatisée par un bilan humain extrêmement lourd, a opté pour le repli, hors des zones submersibles, des activités et du bâti. La force d'une telle décision tient à la rigueur des avis d'experts qui la motivent. La planète se réchauffe. Le niveau des océans monte. A l'instar des gens des îles de l'Océan Indien et des deltas d'Asie, il faut se résoudre à abandonner les zones jadis gagnées sur la mer.

Du sommet de Copenhague au Grenelle de l'environnement, les rapports entre la nature, ceux qui vivent à son contact et les autorités dont la fonction régalienne consiste à les protéger, ont été bouleversés. Du côté des décideurs, la Nature toute puissante a supplanté la foi en sa domestication possible. D'un autre côté, sur les littoraux, les densités ont toujours été plus fortes que dans les terres et ce, en dépit des peurs nées de l'océan : « descentes » ennemies, pénuries de denrées (bleds, bois) et évidemment vimers. Pour y faire face, on a aménagé des citadelles, des ports, des polders agricoles offrant une double sécurité, alimentaire et territoriale, face à la marée. Par le choc frontal des deux conceptions, la tempête Xynthia a souligné crument l'inadéquation des politiques mises en œuvre par les autorités. Le renoncement a servi de doctrine, jeté un voile pudique sur les négligences issues de la « révolution balnéaire », et fait abstraction des traditions anciennes de résistance et de résilience des communautés. Face aux menaces liées aux « changements climatiques », la peur semble simplement avoir changé de camp. Convoquant l'exemple néerlandais, dans l'obsession du « risque zéro », les autorités ont lancé une politique d'abandon rapide, quoique très localisé, des rivages. Domestiquée par les riverains des villages concernés, cette peur est d'autant moins partagée que la mémoire des défenses côtières y reste encore vivace.

L'enquête de mémoire lancée dès avril 2010 auprès des habitants de l'île d'Oléron change la focale. Elle contribue à restaurer la place de l'humain dans le dossier. Les souvenirs des submersions évoquent les moyens de lutte mis en œuvre autrefois et les imprudences commises récemment face au risque. La recherche historique prend le relais en exploitant des archives inédites, révélant la force de la vie communautaire côtière. Le risque présenté comme exceptionnel, irrésistible et fruit d'une évolution irrémédiable est ainsi remis en perspective sur le temps long. Les missions d'enquête parlementaires ont accueilli ces premiers résultats avec intérêt, de même que la Région Poitou-Charentes, qui a souhaité financer une étude élargie. En juin 2010, un colloque pluridisciplinaire a permis de faire valider cette approche par des géographes, des océanographes, des climatologues. Sous la direction d'historiens du Gerhico-EA4270/Poitiers, la géohistoire des territoires du Centre-Ouest impactés par Xynthia occupe une équipe de 7 étudiants de Master 1 d'histoire pour l'année 2010-2011. Les résultats de ces travaux - portant sur Nieul sur mer, Charron, Aytré, Les Boucholeurs, Fouras-l'île d'Aix, Port des Barques et Oléron - devraient permettre de redonner la parole à l'habitant et à l'expérience de terrain, dans un dialogue que l'on espère fécond, avec des autorités acquises à l'idée du primat de la prévision scientifique sur l'expérience du risque, véritable patrimoine immatériel des gens des côtes.

[14] PEDREROS (Rodrigo) et alii. *Tempête Xynthia, rapport préliminaire*, mars 2010, 57p.

[15] GARNIER (Emmanuel) dir., *La crise Xynthia à l'aune de l'histoire : enseignements et enjeux contemporains d'une histoire des submersions*, La Rochelle, 112p., op.cit.p.73 source : www.wetterznetrale.de

La prise en compte des effets du changement climatique dans les nouveaux schémas de protection du littoral en Louisiane et au Mississippi

Jean Marc, Zaninetti[1]

[1]Université d'Orléans UFR LL&SH
10 rue de Tours BP 46527
45065 Orléans cedex 2,
jean-marc.zaninetti@univ-orleans.fr

Abstract :
The failure of the Hurricane Protection System during the onset of hurricane Katrina (August, 29 2005) demonstrated the limits of a coastal protection policy that was solely based on a structural resistance strategy, ignoring the changing conditions of the environment. In the aftermath of hurricane Katrina, the Congress charged the USACE to produce comprehensive technical reports proposing a ―Cat. 5" coastal protection system for the states of Mississippi and Louisiana. The USACE Mobile district published a preliminary version of the Mississippi Coastal Improvement Program (MsCIP) as soon as 2007. Conversely, the New Orleans district published the draft version of the Louisiana Coastal Protection and Restoration report (LaCPR) only in 2009. Because of differences of conception and different methods, comparing these two huge reports, being respectively over 3,600 and 4,000 pages-long, is not an easy task. This paper compares first how these two reports take the climate change into account. Second, it compares their economic ―cost-benefit" analysis. Finally, it concludes by discussing the decisions actually based on these reports to this date in the wider framework of the ongoing reconstruction process of these coastal areas that were ruined by the hurricanes of 2005.

Introduction

La défaillance des digues du *Hurricane Protection System* lors du passage de l'ouragan Katrina le 29 août 2005 a mis en évidence les limites d'une politique de protection du littoral fondée sur une stratégie de résistance statique et ne prenant pas en compte les changements de l'environnement. Le Congrès a mandaté le Corps des Ingénieurs Militaires (*U.S. Army Corps of Engineers USACE*) pour produire rapidement deux rapports techniques détaillés proposant un nouveau plan de protection de haut niveau du littoral. Le premier rapport pour l'état du Mississippi a été confié à la division de Mobile de l'USACE (*Mississippi Coastal Improvement Program, MsCIP*), l'autre pour l'état de Louisiane à été confié à la division de la Nouvelle Orléans (*Louisiana Coastal Protection and Restoration, LaCPR*). Si la division de Mobile a été en mesure de tenir les délais et de publier un rapport technique de près de 3 600 pages dès juillet 2007, il n'en a pas été de même pour la division de la Nouvelle Orléans, qui a repoussé en mars 2009 la publication du rapport technique, long de près de 4 000 pages. Les deux documents présentent des différences tant dans leur conception que dans leur méthodologie, ce qui complique l'analyse à la fois de la prise en compte du changement climatique et des implications économiques de cette prise en compte. C'est pourquoi il convient tout d'abord de considérer la méthodologie de prise en compte du changement climatique dans l'évaluation des risques dans chacun des deux rapports. Nous étudierons dans un second temps la méthodologie d'analyse économique des deux projets, avant de terminer cette présentation par une analyse globale de la prise en compte effective des deux rapports dans le contexte plus large de la reconstruction des littoraux saccagés par les cyclones de l'année 2005.

1. Prise en compte du changement climatique dans l'analyse des risques côtiers dans les états du Mississippi et de la Louisiane

L'élévation relative du niveau marin a été de 60 cm sur l'étendue du 20e siècle en moyenne sur la côte du Mississippi, elle est projetée à 1 mètre sur l'étendue du 21e siècle pour tenir compte de l'accélération de l'élévation prévue du niveau marin suivant les scénarios du 2e rapport du GIEC. Ces données ont été intégrées de manière déterministe dans l'estimation de l'érosion du trait de côte et des risques d'inondation. Les modèles d'aléa du *MsCIP* sont calculés à partir de la simulation numérique de 197 tempêtes différentes dans les conditions de bathymétrie et de topographie actuelles. Le niveau de la sur-côte de marée a ensuite été translaté de manière déterministe de 1 mètre au-dessus du niveau actuel. En l'absence de consensus scientifique autour de cette question, aucune hypothèse n'a été faite relative à l'éventuelle intensification ou accroissement de la fréquence des cyclones dans le Golfe du Mexique.

La méthode adoptée pour le *LaCPR* diffère quelque peu de la précédente. L'analyse de risque s'est appuyée sur la simulation informatique de 304 tempêtes, dont 27 seulement incluaient trois scénarios contrastés sur l'élévation relative du niveau marin, respectivement de 30, 60 et 90 cm. Les simulations indiquent une amplification de la réponse en terme de sur-côte de marée par rapport à l'élévation relative du niveau marin, avec un coefficient multiplicateur variable suivant de la zone étudiée. La question de la subsidence se pose en des termes assez différents sur les littoraux de la Louisiane et du Mississippi. On peut être surpris en premier lieu par l'absence de prise en compte explicite de la subsidence dans l'analyse de l'élévation relative du niveau marin en Louisiane. Les mesures connues indiquent pourtant la perte de 8 mm/ an en moyenne entre 1965 et 2005 pour La Nouvelle Orléans, dont 2 mm / an du fait de l'élévation du niveau marin proprement dite, et 6 mm / an du seul fait de la subsidence du delta. L'analyse de l'érosion du littoral indique que depuis 1985, à la suite du ralentissement des activités d'extraction des hydrocarbures sur le continent, le trait de côte est resté stable à l'ouest du delta du Mississippi (Chenier Plain). On enregistre même des gains de zones humides dans le delta de l'Atchafalaya. Par contre la plaine deltaïque a continué a enregistrer de fortes pertes de zones humides qui ont été converties en lagunes et en baies maritimes. Toutefois, des études antérieures de l'USGS avaient avancé l'idée que la charge sédimentaire du Mississippi était suffisante pour contrebalancer l'effet de l'élévation du niveau marin à moyen terme à condition de restaurer la circulation d'eau douce dans le delta. 20 projets de dérivations ont été mise en chantier ou sont à l'étude actuellement. Il s'agit en effet de la pièce maîtresse de la stratégie de protection du littoral de l'état de Louisiane, dont le schéma directeur a été adopté en 2007 (*CPRA*). L'USACE émet des réserves relatives à l'efficacité de ces diversions, et met en garde contre certains effets potentiellement indésirables. C'est pourquoi un programme complémentaire de modélisation a été décidé pour simuler l'évolution de la plaine deltaïque sous l'effet de cette multiplication des dérivations du fleuve. Dans l'attente des résultats de ces études, ce paramètre n'a pas été pris en compte explicitement dans les modèles du *LaCPR*, conduisant ses auteurs à alerter le lecteur sur le fait que la prise en compte de 3 seuils d'élévation du niveau marin pouvaient surestimer localement l'impact de la subsidence.

2. Méthode d'analyse économique des projets de protection du littoral dans le Mississippi et en Louisiane.

La stratégie dite des « lignes de défense multiples » comporte trois composantes essentielles :

- Des mesures non structurelles de défense du trait de côte et de restauration des îles barrière et des zones humides du littoral.
- Des protections structurelles sous formes d'endiguement, de barrages et de portes de crue.

- Des mesures d'aménagement destinées à réduire l'exposition aux risques en rachetant des propriétés ou en surélevant des bâtiments.

L'USACE a réalisé une analyse coût-bénéfice des différentes options disponibles. Si l'estimation du coût des investissements ne soulève pas de difficultés particulières, il n'en va pas de même de l'estimation de leurs bénéfices potentiels, qui dépend de nombreux paramètres. Un cyclone comme Katrina a causé des pertes multiples, dont le total n'a jamais fait l'objet d'un consensus. Les assurances ont déclaré plus de $42 milliards de pertes. L'état du Mississippi a reçu $24,6 milliards d'aide fédérale à la suite de Katrina. Pour sa part, la Louisiane a reçu plus de $42 milliards d'aide fédérale.

Le *MsCIP* repose sur un certain nombre d'hypothèses :

- La demande pour des résidences littorales ne diminuera pas dans les prochaines années malgré les cyclones.
- Sur le littoral du Mississippi, la reconstruction sera complète dès 2012, mais l'adhésion des collectivités locales aux normes du programme national d'assurance contre les inondations (*National Flood Insurance Program NFIP*) les contraindra à adopter des ordonnances d'aménagement contraignantes qui interdiront l'essentiel de nouveaux développements dans la plaine d'inondation. Le stock de propriétés exposées est donc supposé rester constant dans l'avenir, même si une part croissante peut passer d'un usage exclusivement résidentiel à un usage principalement commercial.
- Les alternatives retenues doivent minimiser l'incitation à de nouveaux développements dans la zone inondable.

Moyennant les calculs et les choix effectués, Le *MsCIP* fait une recommandation claire et chiffrée dès 2007, estimée à $1 milliards d'investissements totaux environ, dont 65 % à la charge du budget fédéral et 35 % à la charge des collectivités locales. La méthode retenue repose sur l'élaboration de scénarios alternatifs à l'horizon 2100 croisant une typologie de l'utilisation du sol (résidentiel ou commercial) et des hypothèses relatives à l'élévation relative du niveau marin. Une estimation de la valeur des propriétés exposées est dérivée de ces scénarios par unité de planification, ce qui permet de calculer les dommages potentiels des cyclones à partir des simulations produites par le modèle *SLOSH* (*Sea, Lakes and Overland Surge caused by Hurricanes*) du *NOAA* en l'absence d'investissements nouveaux dans la protection contre les cyclones. Les différentes options de protection sont alors introduites dans le modèle. D'autres paramètres sont analysés, tel que les revenus générés par la pêche et le tourisme, ainsi que l'impact sur l'emploi Au final, les gains sont estimés et le rapport coût-bénéfice en est dérivé. L'ensemble est annualisé pour faciliter la programmation budgétaire.

Le *LaCPR* procède de même, mais la présentation du rapport ne met pas le chiffrage en avant, laissant la priorité à des considérations qualitatives relatives à l'acceptabilité sociale des mesures préconisées. Au lieu de recommander un plan d'action unifié comme le *MsCIP*, le *LaCPR* se limite à proposer 27 scénarios présentés en terme de forces et faiblesses. L'ensemble des investissements s'établit dans une fourchette très large allant de $59 à $139 milliards, alors que les dégâts estimés si rien n'est fait varient entre $77 milliards pour une inondation centennale et $219 milliards pour une crue millénaire. L'efficacité relative des plans de protection varient d'une réduction de 15 % minimum à une réduction maximale de 85 % de ces dommages selon les alternatives. Le *LaCPR* a suscité des frustrations au moment de sa publication. Les *Corps* ont principalement été critiqués pour leur présentation timorée refusant d'établir des priorités. Les coûts mentionnés sous la forme d'un grand tableau scindé par unité de planification sont exorbitants au regard des moyens disponibles dans un contexte de crise économique et de restrictions budgétaires.

3. Reconstruction du littoral post-Katrina et prise en compte des rapports de l'USACE

Plusieurs observateurs ont relevé la faiblesse de la prise en considération du changement climatique par les deux rapports de l'USACE pour le Mississippi et la Louisiane. Laquelle a été réduite à une discussion très brève sur l'élévation du niveau marin. La lenteur avec laquelle la division de la Nouvelle Orléans a produit son rapport et sa prudence explique sans doute l'écart d'impact des deux rapports. A la suite de la publication de la version finale du rapport *MsCIP* en juin 2009, le Congrès a alloué $439 millions de crédits fédéraux pour le programme de restauration des îles barrières. Par contre, aucune protection structurelle nouvelle n'a été retenue et le programme non structurel *HARP* (*Hazard Area Reduction Plan*) de retrait ordonné du littoral qui préconisait de constituer un fond pour racheter peu à peu 17,000 propriétés indéfendables pour les démolir et renaturaliser le terrain sur lequel elles étaient bâties, souvent d'anciens *wetlands*, a été écarté en raison d'oppositions politiques, alors même que l'analyse coût – bénéfice indiquait que c'était la mesure la plus efficace pour réduire les risques sur le littoral du Mississippi. En Louisiane, le processus de planification de l'intervention fédérale est moins avancé, le rapport préliminaire de mars 2009 est toujours en discussion et le Congrès n'a toujours pris aucune décision attribuant de nouveaux crédits fédéraux à la région en dehors des nombreuses mesures déjà engagées pour mettre La Nouvelle Orléans enfin aux normes de protection contre l'inondation centennale. La Louisiane est donc encore en attente d'une aide fédérale susceptible de l'aider à défendre son littoral contre l'inexorable montée des eaux.

Références :

NOAA, National Hurricane centre (NHC), Sea Lake and Overland Surge caused by Hurricane models : http://www.nhc.noaa.gov/ssurge/index.shtml

State of Louisiana, Coastal protection & restoration program : http://coastal.louisiana.gov/

USACE, LaCPR program : http://lacpr.usace.army.mil/

USACE, MsCIP program : http://www.sam.usace.army.mil/mscip/default.htm

USGS, Coastal Louisiana Land Losses : http://www.nwrc.usgs.gov/special/landloss.htm

COUT DE LA PROTECTION COTIERE EN LANGUEDOC-ROUSSILLON : QUELLE RENTABILITE ?

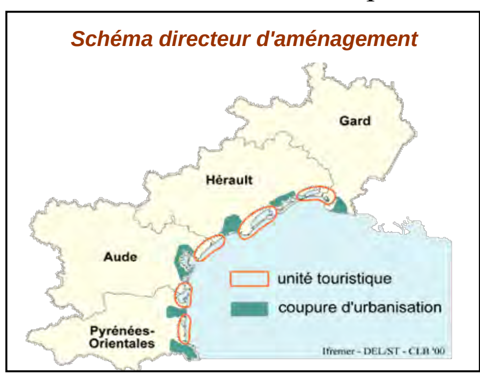
Cyril Vanroye[1], Chloé Auffret[2]

[1]DREAL Languedoc-Roussillon, Montpellier, cyril.vanroye@developpement-durable.gouv.fr
[2]CETE Méditerranée, Aix-en-Provence, Chloe.Auffret@developpement-durable.gouv.fr

Introduction

Le littoral du Languedoc-Roussillon, de par ses caractéristiques physiques, est exposé aux aléas littoraux actuels et se présente, a fortiori, comme particulièrement vulnérable dans le futur : élévation du niveau marin, changement du régime de tempête.

Ce littoral a aussi la spécificité d'avoir fait l'objet d'une opération d'aménagement d'ensemble réalisée de manière concentrée entre 1960 et 1970. Cette opération d'aménagement a été portée par l'Etat qui a assuré la majorité du financement des infrastructures collectives nécessaires au développement des cinq grandes unités touristiques identifiées le long du littoral régional. Le montant des investissement assumés par l'Etat dans le cadre de la mission Racine s'élève à près de 790 millions d'€ 2010 sur la période 1964-1980 (Racine, 1980).



L'objectif de la communication est de proposer des éléments de réflexion sur l'évaluation des coûts d'adaptation en zone côtière au vue des résultats de certains projet (étude « rentabilité de la protection en LR », projet PESETA, rapport ONERC 2009) et de faire émerger les besoins des décideurs locaux en terme d'outils d'aide à la décision.

L'évolution des pratiques de protection

En Languedoc-Roussillon, jusque dans les années 90, la réponse à l'érosion a été locale. Même si quelques schémas directeurs ont tenté de coordonner ces actions, ils n'ont été que partiellement appliqués car souvent mal partagés et peu financés. La lutte contre l'érosion se résumait essentiellement à créer des ouvrages de protection "durs" (épis, brise-lames). Les connaissances scientifiques et techniques de l'époque (ainsi que le manque de mesure sur les conditions naturelles du littoral : houle, dynamique sédimentaire…) n'ont pas permis de bien évaluer l'impact des ouvrages sur le long terme. Aujourd'hui, il apparaît clairement que s'ils ont localement bien répondu aux attentes, ils ont souvent reporté l'érosion sur les secteurs voisins (Samat, 2007).

Le bilan global, tant environnemental qu'économique, reste mitigé à ce jour. Les ouvrages en Languedoc-Roussillon n'ont pas définitivement résolu les problèmes d'érosion. De plus, la

nécessité croissante d‘entretien et de restauration de ces équipements entraîne des surcoûts financiers généralement non prévus dans les budgets initiaux de construction.

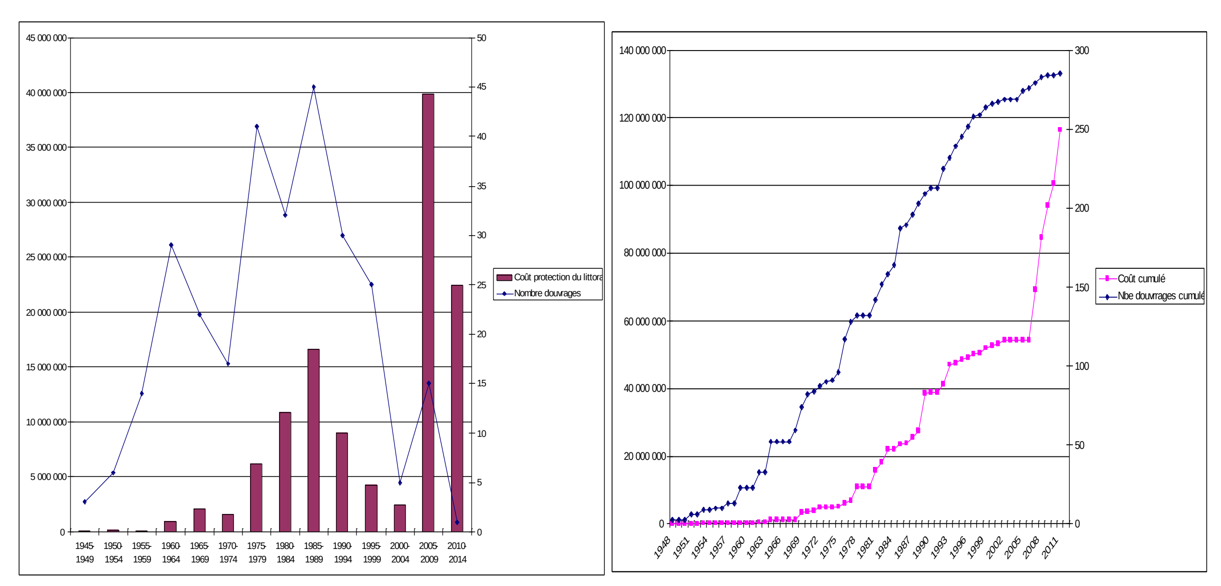
Ainsi l'Etat a impulsé, début 2000, un changement dans les pratiques de protection : dans le cadre des orientations stratégiques pour la gestion de l'érosion, l'Etat au travers d'une Mission interministérielle, a défini en partenariat avec les collectivités des modes de gestion de l'érosion pertinent à l'échelle des cellules sédimentaires. Ces modes de gestion ont été essentiellement basés sur des « techniques douces » (recul stratégique, rechargement, reconstitution et entretien dunaire) et ont marqué une évolution importante dans les pratiques de gestion de l'érosion.

Le coût historique de la protection

La DREAL LR a mis en place un outil de suivi des opérations d'aménagement du littoral et a constitué une base de données des ouvrages de protection. Dans cette base de données sont capitalisées toutes les informations relatives aux réalisations. Afin de reconstituer les coûts liés à la protection, chaque ouvrage est associé à une tranche de réalisation, une année de réalisation et un coût. La DREAL a ainsi pû reconstituer les tranches de réalisation depuis 1948. Ces informations ne sont pas toutes complètes mais cette base est à ce jour le seul outil disponible sur le sujet.

Les coûts ont été actualisés en utilisant l'indice de révision TP02, index couramment utilisé pour l'actualisation des prix en génie civil lorsqu'il s'agit de travaux maritimes.

On dénombre ainsi près de 280 ouvrages de protection sur le littoral Languedoc-Roussillon. Les coûts d'investissement associés à ces réalisations sur la période 1948-2010 avoisinent 117 millions d'euros. Bien évidemment, l'évolution du nombre d'ouvrages est croissant sur la période avec une forte concentration des réalisations pendant et après la période d'exercice de la Mission Racine. La corrélation est très nette entre la matérialisation des enjeux et la demande de protection.



Reconstitution des coûts relatifs à la protection du littoral en Languedoc-Roussillon (1948-2010)

Il faut aussi noter une forte reprise des investissements sur la période 2006-2014 qui résulte de la mise en œuvre des opérations d'aménagement impulsée par la Mission Interministérielle à cette époque. Les montants sont importants sans que cela soit lié à la réalisation d'ouvrages.

C'est que pour la première fois des techniques douces ont été mises en œuvre au travers de deux opérations emblématiques : un rechargement massif sur les plages du Golfe d'Aigues-Mortes (8,7 M€) et surtout le recul stratégique dans le cadre de l'opération d'aménagement et de protection du Lido de Sète à Marseillan (3 tranches de travaux : 41 M€).

A elles seules, le coût de ces deux opérations représente 40% des sommes cumulées dépensées en protection du littoral sur la période 1948-2010.
Ces opérations ont par nature des objectifs plus durables et une vocation plus globale que le recours aux ouvrages de protection classiques. Leur coût semble aussi être plus important.

En complément, le Contrat de Projet Etat-Région sur la période 2007-2013 prévoit un montant d'investissement global de 100 M€ au titre des opérations d'aménagement du littoral.

L'évaluation du coût de la protection à l'horizon 2040
Les orientations stratégiques pour la gestion de l'érosion (MIAL LR, 2003) ont défini par secteurs homogènes des modes de gestion de l'érosion. Pour chaque cellule sédimentaire, il a été entériné l'un des modes suivants :

- le recul, consistant à laisser au système littoral un espace de liberté pour poursuivre son évolution naturelle et retrouver un équilibre, le cas échéant en déplaçant les enjeux menacés,
- la restauration d'un équilibre naturel qui revient à pallier le manque de sédiment en retaurant le fonctionnement naturel (restauration de cordon dunaires, by-pass d'ouvrages) ou en apportant des sédiments au système littoral (rechargement de plage, ...),
- la modification du transit sédimentaire qui vise à interrompre le transit par la mise ne place de techniques « lourdes » (épis, brises-lames) dans le but de stocker localement le sable transitant.

L'objectif de l'étude relative à « l'évaluation de la rentabilité de la protection du littoral en Languedoc-Roussillon » confiée par la DREAL LR au CETE Méditerranée est d'apporter des éléments de réponses sur l'identification des territoires à protéger et le coût associé à cette protection.
Un premier travail d'analyse à consister à évaluer le coût de la protection du littoral sur une durée de 30 ans à compter de 2009.

La démarche à été réalisée en deux étapes :

1) analyse des coûts d'opérations de protection récents afin de dégager des ratios actualisés,
2) évaluation du coût de la protection des différents secteur, en fonction du mode de gestion et en intégrant les coûts d'investissement et d'entretien des ouvrages.

Ces coûts ressortent à près de 351 millions d'€ d'ici à 2040 soit environ 12 M € par an.
La part de l'investissement (resp. entretien) représente 60% de ce montant (resp. 40%).

La suite de l'analyse va évaluer le coût des enjeux protégés au regard d'hypothèses sur les aléas.

Eléments de réflexion - Conclusion

Le projet de recherche PESETA (http://peseta.jrc.ec.europa.eu/) a évalué les coûts d'adaptation au changement climatique suivant différents scénarios pour tous les pays européens à l'horizon 2100. Les résultats de cette étude ont été repris dans une synthèse spécifique commanditée par la Commission européenne, DG Affaires Maritimes et Pêches, et réalisée par Policy Research Corporation en association avec MRAG (Policy Research Corp., 2009). Dans le domaine de la protection du littoral, les coûts considérés sont ceux relatifs à la mise en oeuvre de rechargement ou à la surélévation des digues. Les résultats pour le Languedoc-Roussillon se situerait entre 3 et 5 M€ par an, tout à fait cohérent avec le coût annuel de 12M€ par an (dont 60% d'investissement).

De son côté, dans le cadre de l'ONERC, l'évaluation des dommages potentiels avance des coûts annuels à l'échelle régionale entre 150 et 350 M€ par an.

Ces évaluations sont cependant réalisées sur la base d'approches globales qui méritent d'être affinées afin de guider les choix d'aménagement à la fois. Ces démarches nécessitent aussi un travail d'acquisition de données référentielles (notamment topographiques), de méthodologies d'évaluation de l'impact physique du changement climatique, de méthode détermination des incertitudes ainsi que de démarches stabilisées d'évaluation des coûts.

La réalisation d'Analyses Coûts-Avantages robustes à l'échelle des territoires ainsi que leurs mises en perspective dans une démarche stratégique d'aménagement est indispensable.

Il s'avère d'ores et déjà que les coûts associés à la protection du littoral (notamment dans le cadre de la mise en oeuvre du recul stratégique) seront colossaux en sans aucune mesure avec ceux connus par le passé.

Références :

RACINE P. (1980). *Mission impossible? L'aménagement touristique du littoral du Languedoc-Roussillon*. Editions Midi Libre, Montpellier.

MIALLR, SMNLR, BRL, EID -Mission interministérielle d'aménagement du littoral du Languedoc-Roussillon, Service Maritime et de Navigation du Languedoc Roussillon, BRL ingénierie, Entente Interdépartementale pour la Démoustication- (2003). *Orientations stratégiques pour la gestion de l'érosion en Languedoc-Roussillon,* 24 p,[URL http://www.languedoc-roussillon.pref.gouv.fr/grandsdossiers/missionlittoral/etudes_rapport.shtm]

SAMAT O. (2007). *Efficacité et impact des ouvrages en enrochements sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône.* Thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille 1.

CETE Méditerranée (2010). *Evaluation des coûts de protection des territoires littoraux en Languedoc-Roussillon.* Rapport d'étude pour la DREAL Languedoc-Roussillon.

Policy Research Corporation (in association with MRAG) (2009). *The economics of climate change adaptation in EU coastal aereas.* Final Report for the attention of European Commission – Directorate for Marine Affairs and fisheries.

MISEEVA : Vulnérabilité du système côtier à la submersion marine – Hypothèses et scénarios transdisciplinaires pour évaluer une vulnérabilité future dans le cadre d'un changement global

Vinchon Charlotte[1], Agenais Anne Laurence[1,] Balouin Yann[1,] Baron-Yelles Nacima[2], Berthelier Emmanuelle[3], Bonneton Philippe[4] Charles Jean Christophe[5],,Garcin Manuel[1], Delvallée Etienne[1], Flanquart Hervé[6], Hellequin Anne Peggy[6], Hérivaux Cécile[1], Krien Yann[1], Kuhfuss Laure[5], Lecacheux Sophie[1], Le Cozannet Goneri[1] Marche Fabien[7], Maton Laure[1] Mazeiraud Vincent[3], Meur-Ferec Catherine[6,] Nathan Fabien[3], Rey-Valette Hélène[5], Pedreros Rodrigo[1], Poisson Blanche[1], Romieu Emmanuel[1], Rulleau Benedicte[8]

[1] BRGM/RNSC/RIC BP 36009, 45018 Orléans Cedex 2, c.vinchon@brgm.fr
[2]LVMT EA3582-Université de Marne la vallée-19 rue Alfred Nobel-Cité Descartes-77455 Marne La vallée-Cedex 2 , n.baron@univ-mlv.fr
[3] SOGREAH, 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles, emmanuelle.berthelier@sogreah.fr
[4] EPOC : Université Bordeaux 1; CNRS; UMR 5805-EPOC, Talence, F-33405 France, p.bonneton@epoc.u-bordeaux1.fr
[5] LAMETA, Faculté de sciences économiques-Avenue de la Mer-Site Richter 34 960 Montpellier Cedex 2,helene.rey-valette@univ-montp1.fr
[6] MESHS, UBO, Géomer - LETG - UMR 6554, Institut Européen d'Etudes Marines, Place Nicolas Copernic, Technopôle Brest Iroise, 29 280 PLOUZANE, meurferec@univ-brest.fr
[7] I3M, Fabien Marche , Fabien.Marche@math.univ-montp2.fr,
[8] REEDS, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, Bâtiment Vauban, 47 boulevard Vauban, 78280 Guyancourt, benedicte.rulleau@reeds.uvsq.fr

Résumé :
Le projet MISEEVA (2008-2011), réalisé dans le cadre de l'ANR Vulnérabilité Milieu Climat 2007, a pour objectif de définir la vulnérabilité du système côtier à la submersion marine, dans un contexte de changement global, aux échéances de 2030 et 2100. Les différentes étapes de cette démarche font l'objet de communications dans le cadre des présentes journées JICCRIC 2010. Il s'est agi de définir l'aléa, évaluer les enjeux et les dommages potentiels et d'appréhender la capacité d'adaptation.
La démarche de MISEEVA est fondée sur un certain nombre d'hypothèses pour le futur :

- Des scénarios climatiques, basés sur les modélisations climatiques existantes
- Des hypothèses démographiques et économiques basées sur la connaissance des enjeux actuels et l'analyse des tendances démographiques et économiques actuelles projetées à 2030 et 2100.
- La construction de différentes perspectives de stratégies d'adaptation au changement climatique en 2100 , réalisée à partir des connaissances acquises

Au terme de ces travaux, il reste à croiser les résultats de ces différentes approches pour définir la vulnérabilité systémique de la zone d'étude et à proposer les indicateurs qui permettront de suivre son évolution.

1. Motivation du projet

L'une des conséquences attendues d'un réchauffement climatique dans le siècle à venir l'augmentation des risques côtiers, due notamment à l'élévation du niveau de la mer (Nicchols et al, 2007, Vinchon et al, 2009). L'objectif de MISEEVA est d'évaluer, par une démarche transdisciplinaire et multipartenariale la vulnérabilité du système côtier à la submersion marine aux échéances de 2030 et 2100. On considère les conséquences du changement climatique (élévation du niveau de la mer, évolution du régime des tempêtes,

GIECC 2007) mais également l'évolution possible des enjeux présents et la capacité d'adaptation du système. La zone d'étude choisie est la région Languedoc Roussillon, avec un zoom sur 5 communes côtières (Villeneuve-lés-Maguelone, Pérols, Lattes, Palavas les Flots et Mauguio-Carnon). Cette région est caractérisée par une côte basse sableuse (lidos) isolant la mer des étangs salés, et des enjeux urbains et touristiques importants la rend en effet dès à présent sensible à la submersion.

2. Hypothèses et scénarios

Le développement de ce travail repose sur la mise en place d'hypothèses de travail en termes de scénarios climatiques, de scénarios d'évolutions démographique et économique et de perspectives en terme d'adaptations au regard de différents futurs possibles en 2030 et 2100.

2.1 Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques ont été construits au début du projet à partir du niveau de connaissance actuel des conséquences du changement climatique sur le milieu côtier.. Le GIECC 2007 évalue l'élévation du niveau de la mer entre 13 et 59 cm en 2100 selon les scénarios d'émission de gaz à effet de serre retenus. Des publications postérieures au GIECC 2007 proposent des hypothèses plus pessimistes allant de 1 à 5m (Ramstorf, 2007, Grinsted, 2009, Hansen 2007).

Le choix a été de prendre pour 2100 deux valeurs possibles (i) l'hypothèse médiane du GIECC 2007, soit 35cm, et (ii) l'hypothèse de 1 m (Rahmstorf, 2007).

2030 étant encore dans la fourchette des variations climatiques naturelles, il est difficile de discriminer la part de l'impact du réchauffement sur l'élévation du niveau de la mer. L'interpolation des courbes du GIECC 2007 donnent une valeur de 7 cm en 2030, valeur qui sera retenu pour ce travail.

La connaissance de l'évolution des tempêtes restant à ce jour imprécise (GIEC 2007 Guibelin et Déqué, 2003, un évènement historique de référence a été choisi (tempête de novembre 1982 dite centennale), pour évaluer l'impact des tempêtes similaires dans ce contexte d'élévation du niveau de la mer.

2.2 Scénarios démographiques et économiques

Ces scénarios ont été construits à partir de la connaissance actuelle des tendances démographiques et économiques pour le littoral du Languedoc Roussillon : croissance démographique associée à la migration, population vieillissante et apparition d'une classe sociale pauvre et précaire. PIB positif, poids économique du tourisme . L'occupation du sol du littoral est contrastée entre la façade maritime très urbanisée, et les étangs et leurs périphéries, où se situent les enjeux d'agriculture, de pêche et de biodiversité, en concurrence avec une urbanisation croissante.

Les documents de planification et de prospective (SRADT LR, 2009, DATAR, 2004) permettent d'anticiper **en 2030** une poursuite des tendances plus particulièrement en termes démographique et de croissance du tourisme. Ces documents n'autorisent cependant pas de prédire la situation économique et sociale en **2100**. Deux scénarios sont donc proposés: (i) maintien de la situation actuelle (bien que non plausible) (ii) croissance linéaire de la population, accompagnée d'une stabilité des tendances économiques mais une dessaisonalisation du tourisme.

2.3. Perspectives d'adaptation

L'importance de l'aléa en 2030 sera assez similaire à la situation actuelle, (7 cm d'élévation du niveau de la mer et régime de tempête identique à l'actuel). En revanche la croissance

démographique et de l'emprise du tourisme provoqueront vraisemblablement une croissance des enjeux exposés et donc de la vulnérabilité.
L'incertitude d'une prospective à 2100 est trop grande pour permettre des prédictions. Il s »est donc agi, au vu des résultats à mi projet de proposer des situations d'adaptation imaginées et contrastées, en fonction du comportement de la population et des gestionnaires face au changement climatique. Ces perspectives vont des conséquences du déni d'un changement impliquant une situation de « laisser faire », à une protection intégrale du trait de côte contre les aléas ou à un retrait total. Entre ces perspectives caricaturales, une stratégie composite apparait plus vraisemblable. Elle combinerait la protection de certaines zones d'enjeux considérés comme prioritaires et le laisser faire et/ou le retrait d'autres zones. Cependant, cette stratégie composite peut résulter d'une gestion idéale (Michael 2007) basée sur des études de coûts/bénéfices et la connaissance du risque, ou au contraire d'une protection partielle composée avec du laisser-faire par faute de moyens.

3. Approche de la vulnérabilité sur la base de ces hypothèses

3.1 Analyse de la composante « aléa » (voir R. Pedreros et al, JICCRIC)
A partir des scénarios climatiques établis ci-dessus, différents types de submersions possibles ont été définis en termes de période de retour et de durée. L'élévation du niveau de la mer induira une **submersion permanente** d'un certain nombre de terrains littoraux ; sa valeur est déterminée en cumulant l'élévation du niveau de la mer des différents scénarios et échéances, la marée basse astronomique et le niveau marin associé à des conditions de vagues moyennes. Malgré un faible marnage (59cm), les périodes de haute mer induiront, a minima aux marées d'équinoxe, des zones de **submersion récurrente** : au calcul précédent est ajouté l'amplitude de marée. Enfin, les tempêtes induiront, comme elles le font déjà, des phénomènes de **submersion exceptionnelle,** qui se cumuleront à l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Le calcul de la submersion est fait en cumulant l'élévation du niveau de la mer selon les différents scénarios climatiques, l'amplitude de la marée et les surcotes atmosphériques et liées aux vagues engendrées par les conditions de tempêtes.
Ces éléments de calcul sont approchés en utilisant des modèles imbriqués pour simuler les vagues liées au vent (SWAN, Booj et al,2004) et la surcote atmosphérique et la marée (MARS, Lazure et Dumas, 2008) puis des formules empiriques proposées par Stockdon, (2006) pour évaluer la surcote liée au déferlement et la limite du jet de rive. La chaine de modèles utilisée pour modéliser la submersion exceptionnelle a été validée par des évènements de tempête bien renseignés (1997 et 2007) puis appliquée à la tempête de novembre 1982, en y intégrant les valeurs d'élévation du niveau de la mer des scénarios climatiques et le marnage tidal.
La carte de la figure 1 illustre les résultats de l'approche régionale pour le scénario de 1m d'élévation en 2100, en superposant les données de hauteur d'inondation aux MNT disponibles (IGN et localement LIDAR, mis à disposition par la DREAL LR). L'imprécision du MNT IGN régional induit néanmoins une forte incertitude, qui se cumule notamment à celle des scénarios et qu'il reste à calculer.
Les zones potentiellement inondées en 2030 sont très peu différentes de celles qui peuvent l'être actuellement selon les hypothèses prises pour l'élévation du niveau de la mer et en considérant cette incertitude. En revanche, en 2100, selon les scénarios d'élévation du niveau de la mer proposés, une surface de 2000 et 4000 ha serait submergée de façon permanente, et une surface de 1000 à 14 000 ha le serait de façon récurrente,

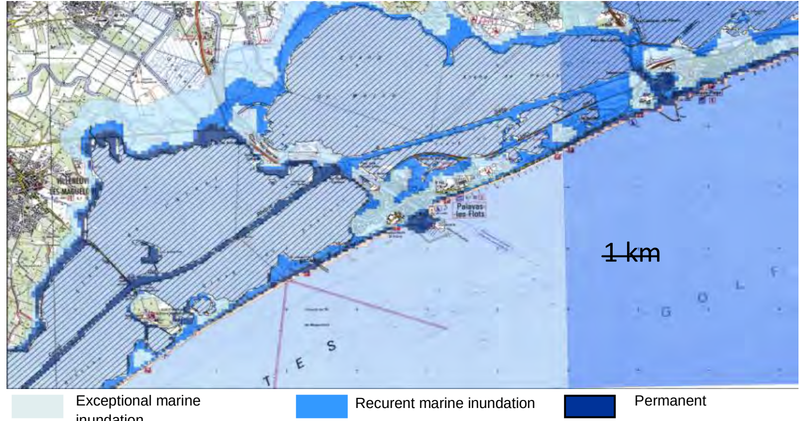


Figure 1 : Extension possible des différentes submersions pour une élévation du niveau de la mer de 1m en 2100

3.2 Analyse de la composante « enjeux exposés et dommages potentiels» (voir C. Herivaux et al, JICCRIC)

L'évaluation des enjeux, de leur valeur et de leur potentialité d'endommagement est basée sur l'analyse de l'occupation du sol à ce jour. La première étape d'inventaire et d'évaluation de la valeur des enjeux a été abordée par différentes méthodes et à différentes échelles selon la typologie des enjeux. Ont été évalué individuellement les enjeux d'urbanisme, d'agriculture, de patrimoine naturel, de ressources en eau et les enjeux liés aux plages. L'enjeu touristique est indirectement analysé par l'évaluation des plages, les capacités d'accueil, le commerce.

Il s'est agi ensuite d'évaluer les fonctions d'endommagement intrinsèques aux différents types d'enjeu ; celles-ci se révèlent très différentes en fonction du type d'enjeu et de la nature permanente, récurrente ou exceptionnelle de la submersion. Ce travail est en cours et doit aboutir à définir des indicateurs de vulnérabilité intrinsèque des différents enjeux.

La figure 2 résume le lien entre les types d'enjeux et l'exposition aux inondations permanentes et récurrentes, selon les scénarios, et souligne la forte exposition aux inondations récurrentes du lido (zones urbaines, plages et espaces naturels) pour l'hypothèse de 1m d'élévation du niveau de la mer de 1m en 2100. Le dommage créé par une inondation permanente ou récurrente est considéré comme une perte irréversible du terrain inondé.

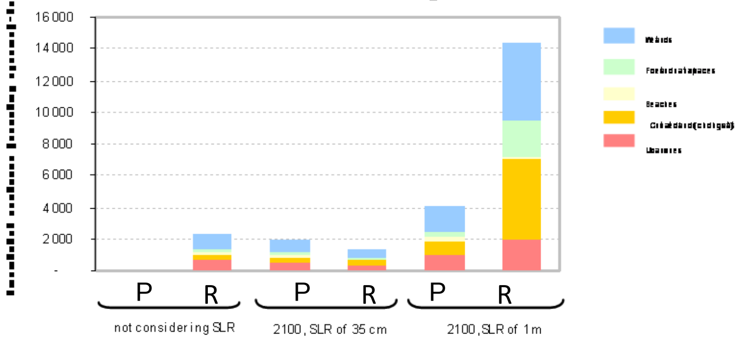


Figure 2 Distribution des zones exposées aux submersions permanentes et récurrentes pour les différents scénarios d'élévation du niveau de la mer.

En 2100, les submersions exceptionnelles atteindraient les lidos, mais aussi les bordures nord des étangs. Les dommages générés par celles-ci seront fonction de la hauteur d'eau mais aussi de la durée de l'inondation, permettant une certaine résilience des enjeux.

Il restera à évaluer l'évolution des enjeux selon les différentes perspectives d'adaptation proposées, et donc d'en déduire l'évolution de leur vulnérabilité.

3.3 Analyse de la capacité d'adaptation

Pour définir la vulnérabilité du territoire littoral à la submersion, il est nécessaire de pondérer les données d'exposition et de vulnérabilité intrinsèque des enjeux en introduisant la notion de capacité d'adaptation du territoire.

Les résultats de l'enquête de perception, réalisée en 2009 auprès des résidents, sont présentés en détail par B Rulleau et al.(JICCRIC) ; le but de cette approche est d'établir des indicateurs de capacité de mobilité, d'attachement au territoire et de sensibilité au risque.
L'analyse de la capacité de réponse des décideurs et des documents de planification et de prospectives existants est présentée par H. Rey-Valette et al (JICCRIC). Les premiers résultats démontrent qu'il sera nécessaire de développer la prise en considération du risque côtier dans les projets d'aménagement actuels et futurs.
Ces approches doivent permettront d'évaluer la capacité d'adaptation et guideront l'incrémentation des perspectives d'adaptation

4. Conclusion

Les travaux réalisés à ce jour dans le projet MISEEVA ont permis d'obtenir une connaissance intégrée et transdisciplinaire du risque de submersion marine. Basée sur un vocabulaire et des hypothèses de travail communs. A ce stade du projet, les différentes composantes de la vulnérabilité ont été abordées. La complexité de la typologie des enjeux et de leur possibilité d'endommagement par un aléa lui-même complexe, et la forte incertitude qui accompagne les différentes approches montrent qu'il sera difficile d'avoir, au terme du projet, une approche exhaustive de la vulnérabilité systémique. Cependant l'agrégation des résultats permettra d'avancer vers un ou des indicateurs de vulnérabilité et de le ou les décliner au regard des perspectives d'adaptation.

References

Booij, N., Haagsma, I.J.G., Holthuijsen, L.H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R.C., van der Westuysen, A.J., Zijlema, M., 2004. Swan Cycle III version 40.41. User's Manual,115 pp.

Conseil Régional du Languedoc Roussillon, 2009. Schéma Régional d'aménagement et de développement durable du territoire (SRADT) 526 p. http://www.laregion.fr/69-amenagement.htm

Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (DATAR) , 2004, Construire ensemble un développement équilibré du littoral. La Documentation française, Paris 155p.

Gibelin, A.L. and Déqué, M., 2003 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. Climate Dyn., 20, 327-339.

Grinsted A., Moore Æ J. C., Jevrejeva S, 2009, Reconstructing sea level from paleo- and projected temperatures 200 to 2100 AD, Climate Dynamics.

Hansen, J. E.,2007, Scientific reticence and sea level rise, Environmental research letter 2 April-June 2007), http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7_2_024002.html

IPCC, 2007, 4th Assessment Report, Climate change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergouvernmental Panel on Climate Change [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA., 2007

Lazure, P., Dumas, F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances in Water Resources 31, pp233–250.

Michael J.A., 2007, Episodic flooding and the cost of sea level rise, Ecological economics, vol 63 pp149-159.

Nicholls R.J., and Tols R. 2007, Regional to global implications of sea level rise: an analysis of the SRES scenarios, Philosophical Transactions of the Royal Society..

Rahmstorf, S., 2007, A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise; Science, VOL 215, 19th January 2007, p. 368, 369

Stockdon, H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and run-up, *Coastal Engineering*, 53(7), pp. 573-588.

Vinchon C., Aubie S., Balouin Y., Closset L., Garcin M., Idier D., Mallet, C. 2009, Anticipate response of climate change on coastal risks at regional scale in Aquitaine and Languedoc Roussillon (France)Ocean & Coastal Management 52 (2009) pp 47–56

Evaluation économique des dommages liés à l'élévation du niveau de la mer : démarche générale et application à la région Languedoc-Roussillon

Cécile Hérivaux[1], Laure Maton[1], Anne-Laurence Agenais[1,3], Yvan Caballero[1], Hélène Rey-Valette[2], Laure Kuhfuss[2], Emmanuelle Berthelier[3]

[1]BRGM/ Service Eau/ Unité NRE et Service géologique régional Languedoc-Roussillon, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier
c.herivaux@brgm.fr
l.maton@brgm.fr
y.caballero@brgm.fr
[2]LAMETA, Faculté d'Economie CS 79606 34960 Montpellier Cedex 2
helene.rey-valette@univ-montp1.fr
laure.kuhfuss@lameta.univ-montp1.fr
[3]SOGREAH, 6, rue de Lorraine, 38 130 ÉCHIROLLES
emmanuelle.berthelier@sogreah.fr
anne-laurence.agenais@sogreah.fr

Introduction

Quels seront les impacts économiques de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique dans le siècle à venir sur la région Languedoc-Roussillon ? Voici une des questions posées dans le cadre du projet MISEEVA (2008-2011) réalisé dans le cadre de l'ANR Vulnérabilité Milieu Climat 2007. Pour explorer cette question, le partenariat de recherche BRGM, LAMETA et SOGREAH a développé un cadre méthodologique d'évaluation des dommages. Cette démarche générale a été bâtie afin de relever plusieurs défis :

- La prise en compte de deux types d'aléa : (1) le premier effet de l'élévation du niveau de la mer (ENM), à savoir l'augmentation progressive du niveau de la mer conduisant si aucune action de défense n'est entreprise à une submersion des terres basses, mais également (2) la modification des caractéristiques d'évènements d'occurrence plus aléatoire tels qu'une tempête de type centennale.
- Englober au mieux la diversité des impacts pouvant être provoqués par l'ENM est également apparu important, à savoir ne pas se limiter aux impacts directs sur la population et les biens marchands tels que le bâti, les infrastructures et les ouvrages de défense, mais d'intégrer également dans la démarche les impacts potentiels liés à la perte de terre et les changements d'occupation du sol associés, ainsi que les impacts liés à une dégradation de milieux naturels tels que les lagunes, les zones humides, les plages, les ressources en eau douce.
- La difficulté de conduire une évaluation économique à un horizon aussi lointain. Aucuns travaux de prospective n'étant disponibles à l'horizon 2100, les seules hypothèses d'évolution réalisées dans le cadre du projet consistent en une projection de tendance démographique ainsi qu'à une stagnation et dessaisonalisation de la fréquentation touristique. Se pose également la question de l'actualisation des dommages à cet horizon temporel : conformément aux recommandations du Commissariat Général du Plan (2005), une hypothèse de taux d'actualisation décroissant de manière continue à partir de 30 ans est retenue.
- La nécessité de prendre en compte une anticipation possible du phénomène par les pouvoirs publics et plusieurs possibilités d'adaptation du Languedoc-Roussillon à l'ENM, qu'elles soient planifiées par les pouvoirs publics ou autonomes. Les impacts

économiques de l'ENM peuvent en effet être totalement différents selon le degré d'anticipation et d'adaptation (Tol, 2007). Cinq perspectives d'adaptation caricaturales ont ainsi été construites par l'équipe de projet: le déni, le laisser faire, la protection intégrale, la protection des cœurs de ville et le retrait intégral.

Les impacts de l'élévation progressive du niveau de la mer
Avec une hypothèse d'élévation du niveau de la mer de +1m à l'horizon 2100, les terres situées à moins de 1,37m NGF d'élévation seraient submergées au moins deux fois par an en 2100 (Lecacheux et al., 2010): plus de 180km² de terres et zones humides seraient concernés. La topographie régionale conjuguée au rythme de progression de l'ENM est telle que l'évolution des superficies submergées serait assez lente jusqu'à 2080 (moins de 50 km² concernés) et suivie d'une augmentation forte des surfaces concernées sur la période 2080-2100.

Selon la perspective d'adaptation retenue, cette submersion progressive pourrait conduire à la perte de terres, la modification de l'occupation du sol, la perte de biens (bâtiments par exemple), le déplacement de population et d'activités économiques, la modification des lagunes et des zones humides, la disparition de plages, la salinisation des ressources en eau douce, tous ces dommages pouvant impacter de manière indirecte différents secteurs de l'économie (tourisme, agriculture, industrie, ménages). Quatre exemples ont été choisis dans cette communication pour illustrer les démarches d'évaluation de dommages.

Le déplacement de la population. La population pourrait être concernée de différentes manière par l'ENM, selon les perspectives d'adaptation considérées : celle-ci pourra être déplacée par anticipation du fait de la submersion, directement affectée par la submersion lorsqu'il n'y a pas d'anticipation, ou alors protégée par des digues, dunes ou autres types de défenses. De 80 000 à 100 000 personnes pourraient être situées en zone de submersion et nécessiter d'être déplacées (jusqu'à 13% de la population des 41 communes concernées). Certaines communes pourraient avoir des difficultés à relocaliser leur population au sein de leur territoire lorsque la réserve foncière est insuffisante. Les coûts liés au déplacement de la population pourraient atteindre jusqu'à 9 millions d'euros par an. Le dommage total actualisé sur la période 2010-2100 est estimé à 15 millions d'euros.

La perte de terres. Selon les perspectives d'adaptation considérées, près de 120 km² de terres « sèches » pourraient être submergées de manière permanente ou récurrente. La transformation de ces terres en zones submergées peut être évaluée par la perte du coût d'opportunité associé (Fankhauser, 1994). Cette perte de terre est évaluée sur la base de la valeur des terres agricoles, considérant que si les terres urbaines ou industrielles sont laissées à la mer, celles-ci seront relocalisées ailleurs, au détriment de zones agricoles ou naturelles. Ces coûts évoluent très peu jusqu'en 2080 (inférieurs à 2 millions d'euros par an) puis augmentent de manière importante pour atteindre 9 millions d'euros par an en 2100. En considérant un taux d'actualisation décroissant, la valeur actualisée totale liée à la perte d'1km² de terres est évaluée à 2,5 millions d'euros, contre 0,4 millions d'euros pour une perte d'1km² en 2070. Le dommage total actualisé lié à la perte de terres est ainsi estimé à 27 millions d'euros.
Dans une perspective de type déni, c'est-à-dire sans anticipation, l'évaluation des dommages devra être complétée par les dommages liés à la perte des bâtiments et infrastructures présentes sur ces terres et n'ayant pas pu être dépréciés. Au contraire, dans des perspectives avec anticipation, on considèrera que les coûts liés à la perte des bâtiments seront minimes, du

fait de leur dépréciation progressive par leur propriétaire par anticipation du phénomène (Yohe et al., 1996).
Certaines terres « sèches » pourraient également, si l‘artificialisation du sol est faible ou retirée, se transformer en zones humides, générant ainsi un dommage moindre, voire un bénéfice pour ces types d‘habitats.

La modification des lagunes et des zones humides. L‘ENM entrainerait d‘une part l‘élévation du niveau de l‘eau dans les lagunes littorales et d‘autre part une submersion des zones humides situées sur leurs pourtours. Les lagunes et les habitats composant ces zones humides sont à l‘origine de nombreux services écosystémiques : ils servent notamment de support pour la pêche et la conchyliculture, la chasse, ils permettent d‘évacuer les crues et d‘épurer les eaux d‘écoulement provenant des bassins versants, et ils abritent une faune et une flore d‘intérêt patrimonial. L‘élévation du niveau d‘eau et par conséquent la salinisation progressive de ces habitats entraîneraient une translation des habitats des zones humides, et donc des services qu‘ils produisent, vers des horizons topographiques plus élevés. Cependant, dans la situation actuelle, de nombreux obstacles s‘opposent à cette translation : bâtis, routes, chemins de fer, etc. Sans retrait de ces obstacles, certains habitats seraient amenés à disparaître, ‗coincés‘ entre l‘élévation du niveau d‘eau et les terres artificialisées, et avec eux, les services écosystémiques qu‘ils produisent. Au contraire, l‘élévation du niveau d‘eau dans les lagunes littorales provoquerait une expansion de cet habitat et éventuellement de certains des services qu‘elles produisent.

La salinisation des ressources en eau douce. Plusieurs aquifères côtiers pourraient être affectés par l‘ENM du fait de (1) la submersion directe des captages par de l‘eau de mer et (2) la progression du biseau salé : la nappe de Mauguio-Lunel, la nappe des calcaires de la Gardiole, les nappes du plio-quaternaire du Roussillon et les nappes des sables astiens. Concernant les deux dernières nappes, celles-ci étant captives, la compréhension du phénomène de biseau salé reste complexe et n‘est pas forcément observé à l‘heure actuelle. Ces aquifères constituent des réserves en eau douce d‘importance régionale et sont aujourd‘hui principalement utilisés pour la production d‘eau potable avec plus de 60 millions de m3 par an. La submersion directe pourrait menacer 1,6 millions de m3 par an pour la production d‘eau potable dans le plioquaternaire du Roussillon et les sables astiens. Selon le principe de Ghyben-Herzberg (Glover, 1959 ; Werner et al., 2009), appliqué aux calcaires de la Gardiole et à la nappe de Mauguio-Lunel, la progression du biseau salé pourrait concerner 5,8 millions de m3 par an prélevés pour la production d‘eau potable. En fonction de l‘importance des volumes exposés à la salinisation, le degré de dépendance à l‘aquifère affecté et la tension en termes de demande sur la ressource, certaines communes ou groupements de communes pourraient se retrouver dans des situations de forte vulnérabilité pour leur production d‘eau potable. En cas de remplacement par des ressources de substitution telles que le dessalement d‘eau de mer, les coûts liés à la diminution du volume d‘eau douce disponible pour l‘eau potable sont estimés entre 6 et 9 millions d‘euros par an selon les perspectives d‘adaptation considérées. Le dommage total actualisé sur la période 2010-2100 est estimé entre 24 et 33 millions d‘euros.

Les impacts d’une tempête de type centennale… en 2100
Une tempête centennale telle que celle de 1982 a été modélisée en 2100 avec la prise en compte de l‘ENM, puis comparée à une même tempête sans ENM. En l‘absence de mise en place de protections, les superficies impactées par cette tempête seraient légèrement supérieures à celles d‘une tempête sans ENM, avec 200 km² concernés (+55%). Toutefois, les terrains touchés par les tempêtes ne seraient pas du tout les mêmes, et seraient situés bien plus

en arrière du trait de côte actuel. Dans la perspective protection intégrale, et en cas de défaillance des protections, ces superficies pourraient par contre représenter le triple des superficies sans ENM et atteindre 390 km². Selon l'option d'adaptation retenue, entre 92 000 et 195 000 personnes pourraient être exposées à ce type de tempête, soit de deux à cinq fois plus que pour une tempête identique, sans ENM.

Les dommages provoqués par ce type de tempête hivernale peuvent être nombreux : dommages aux habitations et à la population, interruption d'activités économiques, dommages aux véhicules, aux routes et infrastructures de communication, dommages aux ouvrages de protection, dommages aux biens historiques et culturels, dommages aux terres agricoles, dommages aux biens environnementaux, tous ces dommages pouvant impacter de manière indirecte différents secteurs de l'économie. L'exemple des dommages aux terres agricoles est ici retenu comme illustration.

Dommages pour l'agriculture. La démarche d'estimation des dommages aux terres agricoles en cas de tempête centennale en 2100 a consisté à développer un modèle intégrant des fonctions de dommages par type de culture, de texture de sol, de période d'occurrence et de niveau d'intensité de l'aléa (Agenais, 2010). Couplé à un système d'information géographique, le modèle permet d'évaluer trois types de dommages : la perte de rendement ou la destruction des cultures, la remise en état des terres et la détérioration de l'équipement. La démarche a été appliquée sur quatre territoires pilote, représentant les trois quarts des superficies agricoles du Languedoc-Roussillon exposées en cas de tempête centennale en 2100. Selon la perspective d'adaptation retenue, une tempête centennale entraînerait de 27 à 43 millions d'euros de dommages (de 1,4 à 2,1 millions d'euros si actualisé) sur ces territoires, soit du double à plus du triple d'une tempête équivalente mais sans ENM. Le dommage moyen est estimé à 2700 euros par hectare, avec des valeurs pouvant varier de 30 euros pour un hectare de friche à plus de 200000 euros pour un hectare de fruits frais sous serre sur terrain limoneux-argileux. La petite Camargue serait le secteur le plus touché, tant en termes de superficie touchée que de dommages.

L'évaluation des dommages liés à l'ENM en cas de tempête centennale devrait théoriquement être complétée par l'évaluation des effets de l'ensemble des types de tempêtes (avec différentes périodes de retour) pour pouvoir être comparée aux dommages liés à l'augmentation progressive du niveau de la mer.

Conclusion

Le partenariat de recherche du projet MISEEVA a permis d'apporter certains éclairages sur les impacts économiques de l'ENM dans le siècle à venir en Languedoc-Roussillon. Les travaux de recherche sur les différents biens et ressources potentiellement affectés par l'ENM sont encore en cours. Les résultats de ces travaux permettront d'avoir une vision globale des dommages potentiels, de comparer spatialement ces dommages à l'échelle de secteurs géographiques ainsi que de construire des indicateurs de vulnérabilité des territoires à l'ENM.

Agenais, A.-L. (2010). Evaluation économique des dommages liés à la submersion marine sur l'agriculture: Construction d'un modèle et application au Languedoc-Roussillon. Mémoire de fin d'études. Montpellier SupAgro, Brgm.: 103p.

Fankhauser, S. (1994). Protection vs. retreat: estimating the costs of sea level rise. CSERGE Working Paper GEC 94-02: 54p.

Glover, R.E., (1959), The pattern of freshwater flow in a coastal aquifer. J. of Geoph. Res. 64: 439-475.

Lecacheux, S., R. Pedreros, et al. (2010). Evaluation simplifiée de la submersion marine à l'échelle du Languedoc-Roussillon.

Plan (2005). Révision du taux d'actualisation des investissements publics, Commissariat Général du Plan.

Tol, R. S. J. (2007). "The double trade-off between adaptation and mitigation for sea level rise: an application of FUND." Mitig Adapt Strat Glob Change 12: 741-753.

Werner, A.D. and Simmons, C. T. (2009), Impact of Sea-Level Rise on Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers. Groundwater, Vol. 47, No. 2, pp. 197–204.

Yohe, G., J. Neumann, et al. (1996). "The economic cost of greenhouse-induced sea-level rise for developed property in the United States." Climatic Change 32: 387-410.

RISK PERCEPTION, A KEY COMPONENT OF SYSTEMIC VULNERABILITY OF COASTAL ZONE TO MARINE INUNDATION. CASE STUDY ON THE FRENCH MEDITERRANEAN COAST

Bénédicte Rulleau[1], Catherine Meur-Ferec[2], Hervé Flanquart[3] et Anne-Peggy Hellequin[4]

[1] REEDS, EA 4456, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, Guyancourt, benedicte.rulleau@reeds.uvsq.fr
[2]UMR 6554 CNRS LETG, Institut Universitaire Européen de la Mer, Université de Bretagne Occidentale, Plouzané, meurferec@univ-brest.fr
[3]Université Lille Nord de France, Lille & TVES, EA 4477, Dunkerque, hflanquart@yahoo.fr
[4]Université Lille Nord de France, Lille & TVES, EA 4477, Dunkerque, aph@univ-littoral.fr

Abstract: This research is founded on an approach of vulnerability based on four main components: hazards (marine-meteorological factors and climate change, geomorphologic process), assets at stake (identification and valuation, market and non market goods, damages valuation), management (public policies of prevention and reparation), and perception of risk. Risks perception has a major position in systemic vulnerability evaluation because it gives precious indications on the variability of the points of view of the stakeholders, the degree of conscientiousness and sensibility of the exposed inhabitants, their attachment to the territory, their reactions in front of the hazard, etc. So it gives indications on their adaptation capacity. Results of a large survey conducted in 2009 over more than 560 inhabitants of a low and very urbanized stretch of the French Mediterranean coast (Palavas zone, Hérault) are analyzed.

1. Introduction

Dans un contexte d'élévation du niveau de la mer et d'intense urbanisation du littoral, l'évaluation de la vulnérabilité côtière représente un défi pour les pays et les communautés concernés. La vulnérabilité globale à la submersion marine peut être vue comme la résultante de plusieurs facteurs (Barnett et al, 2008 ; Cutter, 1996 ; Hoozemans, 1993 ; Nicholls, 1995 ; McFadden et al, 2007), à la fois conjoncturels (risques) et structurels (socio-économiques, culturels, politiques et institutionnels) influençant la capacité de réponse de la société (d'Ercole et al, 1999). La recherche dans ce domaine exige donc une approche transdisciplinaire basée sur quatre composantes (Meur-Ferec et al, 2008) : (1) les risques (facteurs marins et météorologiques, processus géomorphologiques) ; (2) les enjeux, biens et services marchands et non-marchands (identification et évaluation) ; (3) la gestion (politiques publiques de prévention et de réparation) ; (4) la perception de risque.
Cette dernière, bien qu'elle n'ait été prise en considération que tardivement dans l'analyse des risques (Peretti-Watel, 2000) occupe une place importante. Elle fournit en effet des indications précieuses sur la variabilité des points de vue des gestionnaires, le degré de conscience et de sensibilité des habitants exposés, leur attachement au territoire, leurs réactions face au risque, etc. et donc sur la capacité d'adaptation. Elle aide ainsi à s'orienter vers une « bonne gouvernance » des risques[1].

2. Présentation du site et méthodologie de l'enquête

[1] La tempête Xynthia a dramatiquement démontré la grande vulnérabilité de ces territoires côtiers. En sus des problèmes d'efficacité des systèmes d'alerte, de fiabilité des digues et d'autorisation de construire en zone submersible, la question de la perception des risques par les habitants se pose avec une acuité nouvelle.

Le secteur d'enquête est situé sur la côte méditerranéenne française du département de l'Hérault et regroupe trois communes à dominante touristique et résidentielle : Mauguio-Carnon, Palavas-les-Flots et Pérols. La population-mère est constituée de l'ensemble des individus qui possèdent ou utilisent des biens ou services, marchands ou non, potentiellement exposés à l'aléa submersion marine, à savoir les résidents et les commerçants dont les logements/locaux se situent à moins de deux kilomètres du trait de côte. Pour chacune de ces populations, le questionnaire et[2] la méthode d'échantillonnage ont été adaptés. Les enquêtes ont été réalisées en face-à-face sur site en avril et juillet 2009. Au final, 318 résidents principaux, 163 résidents secondaires et 81 commerçants ont été interrogés.

3. Résultats.

3.1. Craintes et confiance

Lorsque l'on soumet aux enquêtés un éventail de risques de toute nature, leurs craintes sont plus marquées envers la maladie grave (34 % en cumulé) et l'accident de la route (19,5 %), deux risques non environnementaux individuels dont l'existence est rappelée chaque jour par les médias et les conversations avec l'entourage et qui donc apparaissent bien réels. La crainte de l'inondation n'arrive qu'en quatrième place (7,5 %) pour cette population installée sur une côte basse. Il apparaît donc que ce risque ne soit pas quelque chose qui obnubile les habitants. Il est vrai que contrairement à l'accident de la route ou la maladie grave, l'inondation n'est que rarement associée dans l'esprit des individus à un danger mortel[3].
Par ailleurs, quand on demande aux enquêtés quels sont les trois les risques environnementaux qu'ils jugent les plus importants pour le littoral de leur commune, la pollution marine et des étangs est le plus souvent choisie (55 % en cumulé), puis la pollution de l'eau ou de l'air (50 %). Les modalités liées à une élévation du niveau de la mer (45,5 %) et à une inondation par la mer ou les étangs (43 %) ne viennent qu'ensuite. Ce relatif désintérêt pour les dangers de submersion marine n'est pas sans conséquence sur la projection de résidence sur le territoire.

Ainsi, à la question « où pensez-vous résider dans vingt ans ? »[4], 45% des résidents principaux répondent « dans le même logement », 70 % souhaitant rester dans un environnement littoral identique ou proche (i.e. languedocien). Quant aux résidents secondaires, 72% « pens[ent] qu['ils] vous posséder[ont] cette résidence dans vingt ans ».
77 % des résidents principaux pensent que la valeur marchande de leur logement va « augmenter » ou « rester stable » ce qui révèle une non prise en considération des éventuelles conséquences économiques des risques côtiers à cette échéance (ou la croyance de leur prise en charge pour les pouvoirs publics via le système CatNat ?). Cette projection s'accompagne d'un fort désir de transmission du logement aux enfants (75 %), beaucoup plus forte chez les résidents secondaires (86 %) que chez les principaux (43 %) (test du χ^2 significatif à 1 %).
Tous ces chiffres montrent une projection de vie future stable sur le territoire enquêté, celle-ci étant encore plus marquée pour les résidents secondaires que pour les principaux, sans doute à cause d'un attachement plus fort au logement (qui peut constituer le point stable au regard d'un parcours professionnel qui amène à changer souvent de résidence principale) et à une moins bonne connaissance des tempêtes hivernales. On ne détecte donc pas de signes

[2] Ainsi, pour les résidents, les thématiques abordées sont (1) le logement (nature de l'habitat et parcours de l'enquêté en termes de résidence), (2) les attraits locaux et l'attachement au territoire, (3) les usages de la plage et des lagunes, (4) la connaissance du risque de submersion marine et le sentiment d'exposition, (5) la capacité de mobilisation et (6) le talon économique et social. Le questionnaire se compose de 158 questions.
[3] L'enquête, réalisée en 2009, est antérieure de près d'un an à la tempête Xynthia du 28 février 2010.
[4] Cette question a été posée en tout début d'enquête et ils ne connaissaient pas à ce stade le sujet de notre étude.

marquants de crainte pour l'avenir de la côte, du moins pas suffisants pour contrecarrer les aménités que procure le littoral et envisager de déplacer sa résidence.
À la question « Selon vous, quels effets pourrait avoir la montée du niveau de la mer en Languedoc-Rousillon ? », 25 % des réponses choisies par les enquêtés concernaient la disparition totale ou partielle des plages. 30 % évoquent une inondation des zones d'arrière lido et 28 % impliquent des dommages sur les secteurs bâtis du lido. 90 % des résidents pensent que « la montée de la mer [pourrait provoquer] dans [leur] commune dans les vingt ans à venir » des dégâts sur le bâti et/ou le réseau routier. 45 % pensent même que des quartiers entiers seront inhabitables. Et, concernant les dommages potentiels à long terme, lorsque l'on demande aux enquêtés « comment [ils] imagin[ent] le lido et les étangs à l'horizon 2100 », 42 % le voient fortement modifié, voire submergé par la montée du niveau de la mer. 65 % pensent que la côte aura subi des modifications majeures, dans un sens plutôt négatif. Seuls 8 % pensent que les choses resteraient quasiment identiques sans interventions particulières et 10 % imaginent que le milieu pourrait être préservé par l'action de l'homme.
Les réponses à ces trois questions ciblées sur les conséquences de la montée du niveau de la mer font apparaître des prévisions de très importants dommages, même à court terme (vingt ans). Cette approche plutôt pessimiste est probablement à mettre en relation avec la forte médiatisation de la problématique du réchauffement climatique qui entraînerait une élévation du niveau de la mer. Cependant de tels résultats peuvent paraître étonnants au regard des projections personnelles qui, comme nous l'avons vu, sont plutôt caractérisées par la stabilité résidentielle et la confiance. Ce décalage vient probablement d'un phénomène de « biais d'optimisme » (Peretti-Watel, 2003) connu en sociologie et psychologie du risque et qui consiste à minimiser les risques auxquels on est personnellement exposé.

3.2 Quelles stratégies pour l'avenir ?
Les stratégies de gestion future du trait de côte impliquent plusieurs options qui sont aujourd'hui clairement exposées, notamment dans le rapport Eurosion (Commission européenne, 2004). Mais si la théorie paraît claire en matière de stratégie globale, les enquêtes auprès de populations révèlent souvent des positions individuelles plus complexes.
Ainsi, 41 % des résidents se prononcent en faveur des brise-lames, enrochements, épis… « pour lutter contre l'érosion de la plage ». Cette information est particulièrement précieuse, car elle montre que les populations restent encore très attachées aux méthodes traditionnelles qui ont probablement un impact important sur les riverains et les élus par leur côté imposant et donc rassurant. Ces méthodes sont pourtant aujourd'hui souvent remises en question, même par les services de l'État qui les ont longtemps prônées (guide Cetmef de gestion de l'érosion côtière, 2010). Cependant, une part presque aussi importante des enquêtés (37 %) préfèrerait des actions par apports de sédiments sur la plage ou les petits fonds, ce qui marque peut-être une évolution vers la reconnaissance de nouvelles techniques qui tardent à se développer en France. Enfin, 10 % sont en faveur du repli stratégique, un score relativement important pour une option qui suscite en général le désaccord farouche des populations locales.

De façon globale, tout type d'enjeux confondus (équipements collectifs, patrimoine culturel, paysage et nature, activités économiques et touristiques, une maison), 33 % des personnes interrogées estiment qu'il faut protéger collectivement « quel qu'en soit le coût » et 40 % « si le coût est raisonnable ». Seuls 14 % pensent qu'il ne faut pas les protéger car la submersion « est inévitable » et 10 % parce que se protéger « est trop cher ». Si l'on tente d'analyser les réponses plus en détail, il semble qu'une certaine hiérarchie des enjeux apparaisse : la volonté de protection collective serait plus forte pour les biens comme les équipements de service public (84 %) et le patrimoine bâti (79 %) et naturel (76,5 %). Les réponses sont aussi fortement positives, mais davantage corrélées au coût, pour les activités économiques (73 %).

Enfin, la protection collective des biens individuels comme une maison est le seul enjeu pour lequel une part importante des personnes interrogées répond « non » (42 %) bien que ce soit le principe du système « Catnat ».

En termes de protection individuelle, 93 % des personnes interrogées n'ont pas pris de dispositions particulières. 5 % des résidents ont fait des travaux de surélévation des parties les plus basses de leur habitation, 7 % ont construit des murets, acheté des planches, installé des drains, fait des travaux d'étanchéité de portes… Le risque de submersion s'est donc que très rarement concrétisé par des interventions matérielles sur les biens, probablement parce que la nécessité ne s'en est pas faite sentir[5].
Lorsque l'on pose aux résident la question « Supposons qu'il y ait véritablement besoin de se protéger contre la submersion marine, seriez-vous prêt à payer pour construire vos propres défenses pour protéger votre maison dans les vingt prochaines années ? », les réponses sont partagées : 57 % répondent non et 41 % oui. Parmi les réponses négatives, les motifs avancés sont tout d'abord la faible exposition au risque (33 %), puis l'inutilité d'une lutte (19 %). 17 % estiment que ces dépense doivent être prises en charge collectivement. On voit donc que si les personnes interrogées sont favorables aux protections collectives pour les équipements collectifs, la question de la protection de biens individuels se pose, tant en termes collectifs qu'en initiatives individuelles.

4. Bilan et perspectives : vers des indicateurs d'adaptation ?

Les résultats de ce type d'enquête sur la perception des risques peuvent s'avérer particulièrement utiles lorsqu'il s'agit d'établir une stratégie à long terme pour la gestion des côtes habitées. La non-prise en considération de ces éléments risque de retarder ou même de nuire à la mise en place des politiques publiques de prévention, de gestion de crise et de réparation des dommages (partage des coûts). Là encore, le mauvais exemple de la gestion des côtes françaises soumises à la tempête Xynthia est éloquent.
Au-delà de l'analyse des résultats de notre enquête nous souhaitons à présent aller plus loin pour développer des indicateurs qui renseigneront sur la capacité de réaction/adaptation des populations concernées. L'objectif est de comprendre et d'expliquer les comportements et adaptations possibles des habitants de la zone Palavas-Pérols-Carnon face aux aléas de submersion marine, mais aussi et surtout, de contribuer à forger un outil d'aide à la décision publique qui peut « fonctionner » dans d'autres territoires littoraux.

Remerciements

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du projet « Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes » (MISEEVA) financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme Vulnérabilité, Milieux, Climat (VMC). Ce projet dans son ensemble est présenté dans un autre article de ces actes. Les auteurs tiennent à remercier les membres du projet pour leurs commentaires et suggestions, ainsi que les personnes qui ont participé à la collecte de données.

[5] En effet, 90 % des enquêtés n'ont pas « été inondé par la mer dans [le] logement/local [concerné] ces dix dernières années ».

THEME 4

Transfert de la recherche vers l'appui aux politiques publiques

QUELLES REPONSES DES POLITIQUES PUBLIQUES FACE A UN RISQUE DE LONG TERME ?

Hélène Rey-Valette[1], Laure Kuhfuss[1], Yann Balouin[2], Cécile Hérivaux[2]

[1]LAMETA, Faculté d'Economie Montpellier
helene.rey-valette@univ-montp1.fr
laure.kuhfuss@lameta.univ-montp1.fr

[2]BRGM Montpellier
y.balouin@brgm.fr
c.herivaux@brgm.fr

Introduction

L'étude des risques liés au changement climatique relève des risques non probabilisables et systémiques qui impliquent de raisonner à un horizon de prospective et de tenir compte des controverses relatives à l'aléa y compris en fonction des politiques d'atténuation, aux dommages et aux principes de partages de ces risques entre générations. Les réponses doivent donc être concertées et planifiées en instaurant des politiques publiques dites d'adaptation, définies comme «l'*ensemble des actions visant à adapter notre société aux nouvelles conditions environnementales créées par le changement climatique pour en limiter les dommages et maximiser les bénéfices* » (GIEC, 2001). Il s'agit de se centrer sur les politiques publiques mises en œuvre dans le cadre du changement climatique car la question de l'adaptation des sociétés et des activités aux variations du climat est une pratique ancienne qui concerne de très nombreux secteurs. De même, l'intérêt des politiques adaptatives a déjà été montré (Holling, 1978), en réponse à l'inadaptation de la gestion rationnelle à la complexité et à l'incertitude, et elles sont préconisées dans le cadre du développement durable. L'objectif de cette communication est de s'interroger sur les principes et les modalités de ces politiques dans le cas du risque de submersion marine de façon générique et pour le Languedoc-Roussillon. Cette analyse s'inscrit dans le cadre du projet MISEEVA, financé par l'ANR et coordonné par le BRGM, auquel elle contribue en précisa nt les modalités possibles de réponse des politiques publiques.

1. Principes et propriétés : des questions méthodologiques aux questions de société

La revue de la littérature montre que la question de l'adaptation au changement climatique (ONERC, 2007, UE 2007, OCDE, 2008, Banque Mondiale 2010, CEDD, 2010) est récente comparativement aux politiques d'atténuation dont elle est indissociable en raison de la « *perte graduelle d'efficacité des stratégies d'adaptation à mesure que l'on s'écarte des scénarios de maîtrise des émissions parvenant à stabiliser le réchauffement à un certain niveau* » (De Perthuis, 2009). Agrawala et Fankhauser (2008) définissent le bénéfice brut de l'adaptation comme « *la différence entre les dommages dus au changement climatique avec et sans adaptation, moins le coût des mesures d'adaptation* ». On retrouve la logique classique de l'évaluation coût bénéfice mais avec des dommages ou pertes évitées qui se substituent aux avantages. Si la logique reste classique, diverses questions méthodologiques interviennent concernant notamment la programmation dans le temps qui est cruciale et controversée. Le choix d'un taux d'actualisation faible, voire décroissant renvoie à un débat de société en termes d'efficacité quant à la prise en compte des progrès technologiques et d'équité entre générations notamment si les générations futures sont plus riches ce qui revient alors selon Marglin (1963, cité par Philibert 1999) « *à taxer les pauvres pour aider les riches », ou à* ce que Baumol (1968, cité par Philibert 1999) qualifie d'une action *« à la robin des bois inversée ».*

Plusieurs propriétés peuvent être mises en avant. Outre l'incertitude entourant ces risques, leur caractère continu (De Perthuis et *al.*, 2010) ou graduel (ONERC, 2007 ; Magnan 2008) avec des effets de seuils et des phénomènes extrêmes, l'interaction entre phénomènes oblige à

envisager des stratégies spécifiques impliquant des transformations profondes des sociétés et une approche dynamique de la vulnérabilité : ainsi le GIEC propose d'adopter une approche dite séquentielle ou pas à pas et le plus possible réversible. Enfin il s'agit de politiques décentralisées et sélectives associant des actions publiques et privées et donnant lieu à des stratégies différentiées selon les échelles en fonction des composantes locales de la vulnérabilité. Les mesures spontanées et décentralisées étant insuffisantes ou même pouvant induire des maladaptations (De Perthuis et *al.*, 2010) la question de la coordination est alors centrale, à la fois entre secteurs, entre périodes, entre territoires pour tenir compte notamment des effets des migrations démographiques sur la vulnérabilité et entre échelles de gouvernance pour répartir l'information, optimiser les synergies et éviter les reports de vulnérabilité d'un territoire à l'autre si les réponses ou non réponses apportées dans une zone accentuent le phénomène ailleurs. Il s'agit de faire évoluer les stratégies d'aménagement du territoire de façon à se coordonner avec les politiques existantes mais aussi de définir de nouveaux critères d'évaluation des projets, à travers par exemple la notion de « prisme climatique » (Banque Mondiale, 2010) ou «*climate proofing*» (UE 2007). Il ne s'agit donc pas d'une simple politique additionnelle mais bien, comme le développement durable, d'une nouvelle norme ou référentiel qui doit se diffuser et faire évoluer l'ensemble des politiques publiques et des pratiques, avec des ajustements qui relèvent de trois niveaux selon qu'ils modifient les dimensions, les instruments ou les objectifs des politiques existantes (Urwin et Jordan, 2007). A terme, elles pourront être déterminantes des subventions et des modalités d'assurance qui pourront être conditionnées à la mise en œuvre préalable de mesures d'adaptation. Ces politiques d'adaptation se distinguent des notions classiques de correction et de précaution (Chevassus, 2007) et, même si elles en partagent la philosophie, ne sont pas non plus assimilables au principe de précaution puisque leur objectif n'est pas de réduire le risque mais ses effets. Quelques travaux tentent d'évaluer le bénéfice de ces mesures. Tandis que la Banque Mondiale (2010) estime que 60 millions de personnes pourraient être concernées par une augmentation de 1 m du niveau de la mer avec des dommages de 200 milliards de $ pour les seuls pays en voie de développement, le rapport Stern évalue entre 15 et 150 milliards par an, les coûts supplémentaires liés à l'adaptation. L'Union Européenne (2007) propose une comparaison du coût des dommages avec et sans adaptation en 2020 et en 2080 qui montre l'intérêt manifeste de ces politiques en 2080 avec des dommages qui sont ainsi quatre fois plus faibles. De même l'effet de protection d'une digue pour le Languedoc-Roussillon (Hallegatte et Dumas, 2010 in De Perthuis et *al.*, 2010) est évalué en considérant plusieurs situations d'adaptation, stricte ou optimale, et plusieurs hauteurs de digues. Les résultats sont fonctions du niveau actuel de protection, et montrent que des digues de 2m dont le coût est de 3,90 milliards d'euros permettent d'éviter pour 24 milliards de dommages relatifs à l'habitat et aux infrastructures.

2. Quelles stratégies ? Comment coordonner des mesures décentralisées ?

Le groupe de travail interministériel sur l'impact du changement climatique (2008) propose une typologie des adaptations possibles selon qu'elles sont autonomes ou planifiées, privées ou publiques, non réversibles lorsqu'elles portent sur une durée de vie importante comme l'habitat ou le génie civil et enfin inertes lorsqu'elles concernent l'évolution des valeurs et des institutions qui suppose d'importants délais. On retrouve pour partie la même typologie chez Agrawala et Fankhauser (2008) autour de trois facteurs, le temps (anticipation, réaction), l'échelle (local, régional), l'impulsion (autonome ou planifiée) et le type d'acteurs (individu ou collectivité ; privé ou public). L'analyse des stratégies nationales d'adaptation mises en œuvre en Europe (Biesbrock et *al.*, 2010) montre l'importance stratégique de l'information scientifique, des sensibilités différentes (sécheresse en Europe du Sud et inondation pour le nord) et des options différentiées. Certains pays se focalisent sur les secteurs les plus

vulnérables tandis que d'autres ont des approches globales et que seuls certains pays du Nord et du centre de l'Europe ont intégré les bénéfices du changement climatique (Pays-Bas, UK, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Lettonie). Cependant la plupart des Stratégies Nationales d'Adaptation ne définissent pas clairement les échelles locales et régionales, ni la répartition des rôles entre secteurs. Alors que seulement quelques pays ont réellement mis en œuvre des stratégies de communication, tous les pays soulignent l'importance de l'information et le besoin d'indicateurs pour lesquels l'Agence Européenne de l'Environnement propose de commencer par quantifier les changements nécessaires.

De nombreux travaux mettent l'accent sur l'importance de l'anticipation et le rôle du secteur public dans ce domaine notamment par rapport à la mise à disposition de données scientifiques, en soulignant que celles-ci sont très peu disponibles aux échelles locales, où il s'agit pourtant de penser la spécificité des mesures. Plus précisément Burton *et al.* (1993 cités par IPCC 1994) dénombrent six comportements envisageables, de prévention par anticipation, de tolérance des pertes, de partage des pertes au sein d'une population plus large que celle directement affectée, de changement d'usages ou d'activités, de délocalisation et de restauration du système à son état initial après chaque évènement climatique. On peut *in fine* distinguer deux types de mesures (Titus 1998) : l'usage de technologies (dures ou douces comme le rechargement des plages) pour adapter les usages et réduire l'exposition ou des adaptations basées sur l'amélioration de la gestion des écosystèmes de façon d'une part à augmenter leur résilience et d'autre part à renforcer certains services écosystèmiques, tels que par exemple le rôle ‗tampon' des zones humides lors d'évènements exceptionnels (Banque Mondiale, 2010). Plus spécifiquement par rapport à la submersion marine des zones côtières l'IPCC (2001) retient trois stratégies: la protection et l'accommodation qui supposent des aménagements en dur ou des méthodes douces d'ampleur plus ou moins importante et le retrait stratégique ou « réalignement planifié » (Turner et al. 2006) qui implique la destruction volontaire des infrastructures dures de protection (digues par exemple) pour permettre la réimplantation de zones humides et faciliter le fonctionnement naturel du trait de côte. Ce type de politique de retrait des enjeux anthropiques permet en outre d'éviter la perte d'écosystèmes coincés entre l'avancée du niveau de la mer et les infrastructures (*coastal squeeze*). Les politiques de retrait peuvent intervenir de différentes façons : par la définition de zonages restreignant le développement à une distance minimale de la côte, par le «*rolling easement*» où les enjeux sont maintenus à court terme sans mesures de protection et deviennent progressivement la propriété de l'Etat (car localisés sur le Domaine Public Maritime) sans indemnisation et enfin par l'arrêt des subventions ou des assurances qui réduit la valeur des biens et l'attractivité des territoires.

3. Quelles perspectives en Languedoc-Roussillon ?

Le plan climat du Languedoc-Roussillon a pour ambition de maintenir l'attractivité du territoire en tenant compte des risques naturels. Plusieurs mesures sont directement liées au risque de submersion marine, dont une intitulée « *anticiper et adapter à l'évolution du trait de côte* » qui vise à poursuivre et étendre les opérations de lutte contre l'érosion côtière en s'adaptant à des risques plus fréquents. Elle se décline en plusieurs sous mesures : amélioration des connaissances, prévention et sensibilisation, réflexion sur l'aménagement des sites les plus vulnérables. Il est aussi prévu de créer une instance de concertation autour de l'adaptation, d'intégrer le changement climatique dans les PPR, les PAPI, les contrats de rivière…, de renforcer le volet adaptation dans les produits de sortie du SRADDT et enfin de mener des actions spécifiques pour les activités touristiques à travers notamment la sensibilisation des collectivités et des acteurs du secteur. Il est prévu des mesures de soutien de la recherche pour renforcer l'aide à la décision concernant l'adaptation, la sensibilisation des élus et la mise en conformité des documents d'urbanisme avec les PPR submersion

marine. Il existe en effet depuis Octobre 2008, un guide pour les PPR submersion marine pour le Languedoc-Roussillon (DRE-LR, 2008), qui constitue une sorte de région modèle en la matière. Plus récemment, en relation avec l'ouvrage de référence du MEEDDM (2010) trois réunions de concertation ont été réalisées par le Préfet et les services de l'Etat pour faire prendre conscience, notamment aux élus, du besoin de s'adapter dès à présent au risque de submersion. L'accent a été mis sur les limites des politiques actuelles de rechargement qui pourraient s'avérer coûteuses et non généralisables et qui ne dispensent pas de réfléchir à des stratégies durables à long terme tel que le recul stratégique. Le retrait de la route côtière du Lido de Sète constitue le premier grand projet emblématique de ce type de politique. Cependant, dans les faits, le retrait stratégique est loin de faire l'unanimité du fait des difficultés de financement et d'acceptabilité, sachant que les décideurs ont une capacité de projection temporelle limitée à 25-30 ans (Ecofys MEDCIE, 2008). Il convient en effet de tenir compte de la capacité d'adaptation laquelle est fortement liée à la sensibilité mais aussi à la capacité de mobilisation et de gouvernance, compte tenu notamment de la croissance des dispositifs de type BOT (Build Operate and Transfer) notamment dans le domaine des infrastructures. La réflexion menée en Bretagne (Blanchard et Le Guellec, 2009) identifie plusieurs scénarios. Les futures stratégies d'adaptation pourront être la résultante d'une régulation mondiale (« un pilote pour la planète ») ou nationale (« l'Etat climatiseur ») ou de régulations concertées (« ensemble contre vents et marées »), ou pourront s'effectuer sans coordination (« grâce à nous le déluge »). Il est aussi nécessaire de respecter les phases de l'innovation (Banque Mondiale, 2010) dans une logique de progressivité où les actions actuelles concernent d'abord l'information de façon à réduire les incertitudes et l'élaboration de systèmes d'alertes, tel par exemple la production quotidienne par Météo France dès 2011 de cartes de vigilance sur les vagues de submersion. La priorité doit être donnée aux mesures sans regret et qui soient les plus flexibles possibles. Par la suite les décideurs de 2050 qui seront nés en 2010 auront intégré ces questions et pourront innover de façon plus radicale dans la philosophie des mesures, notamment de par leur sensibilité plus forte aux questions environnementales, au profit de politiques basées sur la réhabilitation des services rendus par les écosystèmes. On peut aussi espérer comme le souligne l'AFPCN (2008), bénéficier des innovations liées à l'ingénierie sociétale dans une société où la mutualisation et démocratisation de la responsabilité devrait être croissante. Il convient cependant de veiller à ce que ces politiques ne soient pas un vecteur de renforcement des inégalités, notamment entre territoires, et en particulier, entre pays du Nord et du Sud mais aussi à propos des questions jusqu'à présent peu abordées d'allocation et de redistribution des fonds publics, notamment quant aux choix des seuils d'assurabilité et aux modalités de réassurance, donnant lieu à des produits financiers de plus en plus complexes (CGDD, 2009 ; Godard et *al*., 2002). L'adaptation qui fait l'objet de nombreux travaux se concrétisera par une stratégie nationale en 2011 et communautaire en 2013.

BIBLIOGRAPHIE

Agrawala S. Fankhauser S., 2008. Aspects Economiques de l'adaptation au changement climatique: coûts, bénéfices et instruments économiques, OECD, Paris, Juin 2008,

Banque Mondiale, Rapport sur le développement mondial 2010. Développement et changement climatique. World Bank & Pearson Ed., Washington DC, 412 p.

Biesbroek et al 2010 ―Europe adapts to climate change: Comparing National Adaptation Strategies", Global Environmental Change 2010. In press.

Blanchard G., Le Guellec J.L., 2009. Pouvoirs et démocratie en Bretagne à l'épreuve du changement climatique à l'horizon 2030. Conseil économique et social Bretagne, 195 p.

CGDD, 2009. Assurance des risques naturels en France. Etudes & documents n° 1, 128 p.

Chevassus-au-Louis B., L'analyse des risques. Quae Ed. Coll. Science en Questions, 95 p.

Commissariat Général du Développement Durable (2009). L'économie verte en perspective, Horizon 2030-2050, Lettre de veille de la mission prospective. Paris, n°1 sept.oct., pp. 3-10.
DRE-LR, 2008. Guide d'élaboration des plans de prévention des risques de submersion marine en Languedoc-Roussillon, 19 p.
ECOFYS MEDCIE, 2008. Etudes des effets du changement climatique sur le grand sud est. Rapport Languedoc Roussillon.
Godard O., 2009. Equité et transmission au cœur de l'arbitrage entre adaptation et mitigation. In Adaptation au changement climatique. Liaison Energie Francophonie, 85 4° trimestre 2009, 49-54.
Godard O., Henry C., Lagadec P., Michel-Kerjan E., 2002. Traité des nouveaux risques. Précaution, crise, assurance. Gallimard Ed. Paris, 620 p.
Hallegatte S., Dumas P., 2010. Adaptation, gestion des risques et analyse couts bénéfices : illustration sur le cas du Languedoc-Roussillon et de la montée du niveau de la mer. In Perthuis (de) C., Hallegatte S. Lecop F., 2010. Economie de l'adaptation au changement climatique. Conseil Economique pour le Développement Durable, Février 2010, 89 p.
Holling C.S., 1978. Adaptative Environmental Assessment and Management. John Wiley & Sons, New-York, 377 p.
IPCC 2001 ―Coastal zones and marine ecosystems" *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Chapter 6.*
Magnan A., 2008. L'adaptation « toile de fond » du développement durable. Synthèse IDDRI, Changement climatique N°8, 2008, 4 p.
MEEDDM, 2010. La gestion du trait de côte. Quae Ed., Paris, Coll. Savoir Faire, 290 p.
MEEDDM, 2009. Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France,
ONERC, 2007. Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. La documentation Française, Paris, 95 p.
Perthuis (de) C., Hallegatte S. Lecop F., 2010. Economie de l'adaptation au changement climatique. Conseil Economique pour le Développement Durable, Février 2010, 89 P.
Perthuis (de) C., 2009. Et pour quelques degrés de plus. Nos choix économiques face au risqué climatique. Paris Pearson, 306 p.
Philibert C., 1999. The economics of climate change and the theory of discounting. Energy Policy, 27, 913-927.
SOGREAH, 2009. Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France,
Titus 1998 « Rising seas, Coastal erosion, and the takings clause: how to save wetlands and beaches without hurting property owners » Maryland Law Review 1998 57(4) p.1279-1391.
Turner R.K., D. Burgess, D. Hadley, E. Combes and N. Jackson 2006 ―Coastal management in the 21st century: coping strategies for vulnerability reduction" CSERGE Working Paper ECM 06-04
UE, 2007. Livre vert. Adaptation au changement climatique en Europe: les possibilités d'action de l'Union Européenne Com (2007) 354 final, 32 p.
Urwin and Jordan 2008 ―Does public policy support or undermine climate change adaptation? Exploring policy interplay across different scales of governance" Global Environmental Change 18 (2008) 180–191.

Gouvernance des risques climatiques et vulnérabilité du littoral: Méthodologie du scénario 2030, de l'atelier de parties prenantes et des représentations sociales

Marc Poumadère[1], Raquel Bohn Bertoldo[2], Yann Balouin[3], Déborah Idier[3], Cyril Mallet[3], Marc Robin[4], Marie-Hélène Ruz[5], Carlos Oliveros[3]

[1]Institut Symlog, 262, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, poumadere@wanadoo.fr
[2] ISCTE-IUL, Av. das Forças Armadas, 1649-026, Lisboa, Portugal,
[3]BRGM, 3, av. C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2
[4]LETG, UMR CNRS 6554, Pôle Mer et Littoral, Univ. de Nantes, BP 81227, 44312 Nantes cedex 3
[5]LOG, Univ. du Littoral Côte d'Opale, MREI 2, 189A Av. M. Schumann, 59140 Dunkerque

Abstract:
As part of the ANR VULSACO project (VULnerability of SAndy COast to climate change and anthropic pressure), a specific methodology including a 2030 scenario of a major storm event, a workshop and social representations analysis, is developped and applied to better understand the role played by stake holders in aggravating or reducing the vulnerabilty of low-lying linear sandy coastal systems.

1-Introduction

Un des objectifs du projet VULSACO est de mieux comprendre le rôle potentiellement aggravant ou modérateur que peut avoir le facteur d'occupation humaine sur la vulnérabilité du littoral dans la perspective du changement climatique à l'horizon des années 2030 sur les plages du lido de Sète (34), du Truc Vert (33), de La Tresson (85), et de Dewulf (59), ces plages sableuses représentant différents environnements hydrodynamiques et socio-économiques avec leurs propres caractéristiques morphologiques, physiques, d'occupation et d'utilisation de l'espace (Idier et al., 2010).
Le rôle des décisions humaines peut être déterminant pour l'incrément de la vulnérabilité –par l'occupation, ou pas, de zones à risque – et sa gestion – mise en place, ou pas, de systèmes de protection. Dupuy (2008) a développé une réflexion en soulignant que l'incertitude sur les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle planétaire dans quelques dizaines d'années est responsable pour moitié de l'incertitude sur le réchauffement climatique en 2100. Ces émissions étant largement dépendantes des activités humaines de production et de mitigation, il conclut que ce serait une simplification grossière de traiter le système climatique comme s'il s'agissait d'un système dynamique physique.
Considérant que les réponses contre les menaces marines concernent de nombreuses parties prenantes (PP), la prise en compte des divers enjeux en présence et des raisonnements qui leur sont associés requièrent une méthodologie spécifique. Dans la mesure où l'avenir dépendra en partie des décisions qui seront prises en fonction de l'anticipation de celui-ci, l'intégration des PP s'effectue dans le cadre d'un atelier de mise en situation basé sur un scénario de tempête en 2030. En lien avec cet atelier, deux niveaux d'analyse sont utilisés et reposent sur les représentations sociales (principes abstraits) et sur les prises de décisions (principes pragmatiques). Les représentations sociales sont des croyances et connaissances qui orientent l'action d'un groupe donné envers un objet social significatif. Comme ces notions modèlent le comportement collectif envers ces objets, les représentations sociales sont partagées par tous les membres, ce qui permet un langage commun. S'agissant de réalités assez abstraites et stables (Doise, 1982), les représentations sociales peuvent être généralisées par les groupes de PP de tous les sites. La prise de décision reflète en partie les représentations sociales.

Néanmoins, les principes pragmatiques dépendent davantage des priorités locales, des réseaux dont les PP peuvent faire partie, des conditions politiques, socioéconomiques, etc. Les conditions pour l‘action étant moins stables, les conditions pour la prise de décision doivent être analysées dans chaque contexte particulier. Pour cette raison les ateliers de prise de décision ont été organisés pour chaque site. Compte tenu de ces deux aspects (les représentations et les prises de décision), une méthodologie spécifique a été développée pour mieux connaître les processus et les contenus des décisions des parties prenantes locales, ainsi que leurs stratégies de gouvernance des risques climatiques en 2030.

2-Méthode

La méthodologie du scénario et de l'atelier de parties prenantes avec analyse des représentations sociales retenue dans ce cadre comprend les étapes suivantes.

2.1. Composition d‘une liste de participants

Chaque partenaire responsable de site a composé une liste des PP dans sa région. Ces PP comprenaient notamment des représentants des services publics, des collectivités locales, des entreprises, des associations. Ces personnes étaient informées par courriel des principaux objectifs du projet et invités à faire part de leur point de vue lors d'un entretien téléphonique.

2.2. Entretiens

Les entretiens ont été conduits pour les sites de Truc Vert (22 participants), du lido de Sète (18) et de la Tresson-Noirmoutier (60) entre les mois de Novembre 2009 et Mai 2010. Ils avaient comme objectif :

- La construction d‘un scénario socio-économique pour chaque site en 2030
- L'implication personnelle des PP dans le projet et, conséquemment, de faciliter leur participation à l‘étape suivante du projet – l' atelier
- D'enrichir les contenus débattus lors des ateliers à partir d‘une réflexion antérieure. Ainsi, l‘atelier serait une confrontation des points de vue déjà développés plutôt que la construction initiale d‘un point de vue.

2.3. Questionnaire

Le questionnaire sur les représentations sociales du changement climatique était envoyé par courriel aux participants suite à l‘entretien.

Ce questionnaire comprenait les instruments suivants :

- **Contenus de la représentation sociale (Evoc)**. Les participants devaient écrire les cinq mots ou expressions qui leur venaient à l‘esprit lors qu‘ils pensaient au ‗changement climatique‘ (CC). Leurs réponses étaient classées par le logiciel Evoc 2000 (Scano et al., 2002) pour identifier les éléments les plus prototypiques du CC.
- **Structure de la représentation sociale (Similitude)**. Douze caractéristiques du CC sont proposées et les participants devaient les répartir en 4 groupes de 3 éléments, en fonction de la proximité avec leur propre idée du CC. Cette démarche a permis la composition de blocs de similitude plus ou moins proches en sens du CC. Ces relations de similitude peuvent être synthétisées par l‘arbre maximum (qui garde les liaisons les plus fortes entre les éléments) obtenu à partir du logiciel Similitude 2000 (Junique et al., 2002).

2.4. Ateliers

Le scénario de tempête 2030 présenté au début des ateliers par les scientifiques partenaires du projet s'appuyait sur des données physiques montrant le cumul d'événements, inédit mais plausible, avec des représentations visuelles (e.g. photo satellite de Noirmoutier avant/après la tempête). Des articles de presse également datés de 2030 intégraient dans une narration journalistique les impacts socio-économiques de la tempête fictive et parfois des controverses. Dans un deuxième temps et sur la base de ces données, les PP seules sont réunies en groupe de consultation dont la mission était d'élaborer les décisions à prendre dans cette situation de

post-tempête (hors gestion de crise) en 2030. Quand le groupe souhaitait des informations sur la période 2010-2030 (e.g. événements extrêmes, évolution des politiques de gestion) deux questions écrites pouvaient être adressées aux scientifiques qui répondaient également par écrit. Le travail du groupe était enregistré et a fait l'objet d'une analyse de contenu systématique – Alceste (Reinert, 1998). La fin de l'atelier voyait de nouveau l'ensemble des participants (PP et chercheurs) réunis pour échanger leurs impressions dans le cadre d'un débriefing.
Les ateliers ont été conduits sur les sites de la côte Aquitaine (Truc Vert, 6 participants), de l'île de Noirmoutier (La Tresson, 11 participants) et du Lido de Sète (10 participants).
Sur le site de Dunkerque, les perceptions locales ont été étudiées à partir d'un nombre élevé de réponses aux questionnaires (20).
En contraste avec les forums ou débats organisés pour associer la société civile à la gouvernance des risques, on notera ici: l'identification des PP pour un territoire, l'implication/préparation par les interviews et questionnaires individuels, la construction de données précises bien que fictives, la situation de groupe et l'élaboration collective de décisions par les PP.

3-Quelques résultats marquants

3.1-Ateliers

Les scénarios fictifs de tempête 2030 ont été reçus comme étant réalistes, pouvant même affecter certains participants (carte satellite de Noirmoutier "coupée en deux" après la tempête fictive de 2030). Les participants ont souligné que le cadre de l'atelier 2030 leur a permis de considérer et de discuter des enjeux dont tout le monde est conscient mais difficiles à aborder dans la situation réelle. La notion de recul stratégique paraît connue des PP et fait partie des options considérées. Un consensus devient difficile dans l'atelier quand un enjeu spécifique (e.g. voie ferrée, lido de Sète; gains de terrain sur la mer, Noirmoutier) vient s'opposer à une option de recul paraissant alors trop radicale. La durée de vie des protections à 20-30 ans paraît une limite acceptable. Les participants intègrent également une stratégie de communication visant à rassurer les touristes sur la remise en état des plages après la tempête (Truc Vert). Bien que transversal aux sujets en cause, le changement climatique a été peu évoqué directement lors des discussions.

3.2-Représentations sociales

L'analyse des représentations sociales montre que le changement climatique est conçu par ces participants de façon similaire à la majorité de la population. Ils intègrent néanmoins au noyau central des notions liées aux tempêtes et aux événements extrêmes. D'un côté, ces résultats sont parfaitement compatibles avec l'exposition accrue des habitants du littoral aux tempêtes, étant donné que la réalité vécue par les participants est « re-présentée ». C'est-à-dire, elle est toujours présente. De l'autre, le fait que la tempête Xynthia ait eu lieu pendant le recueil des données peut avoir influencé ces résultats dans le sens d'accentuer les contenus relatifs aux tempêtes (figure 1).

4-Conclusion

La méthodologie du scénario fictif de tempête en 2030 et de l'atelier ont permis d'intégrer le rôle des PP dans l'étude des vulnérabilités du littoral. La réalité de la situation de groupe et de l'élaboration collective de données construites avec précision bien que fictives, ont permis aux PP d'envisager et de discuter le sujet, délicat et affectivement chargé, d'une tempête sur leur territoire. Les décisions prises après la tempête fictive 2030 incluent, selon les sites, des approches de recul stratégique (mais remises en cause quand un enjeu spécifique est défendu), de communication (pour éviter la stigmatisation de la région) et de lucidité quant à la durée de

vie restreinte des protections. L'organisation de la représentation sociale des PP autour d'éléments concrets de leur activité indiquent leur implication effective dans le phénomène.
L'engagement remarquable des PP dans ce travail d'élaboration en atelier, parfois éprouvant quand elles se trouvent confrontées à des données qu'elles préfèreraient ne pas avoir à considérer, tient en grande partie au caractère interdisciplinaire et relativement complet de la situation de recherche construite. Cette construction interdisciplinaire passe notamment par l'acceptation par chacun d'être dépendant des savoirs d'autrui, et par la coordination des complémentarités.

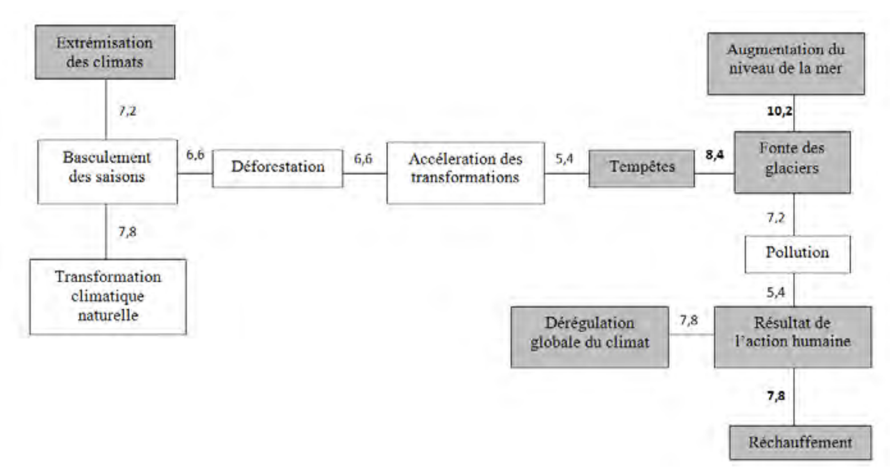


Figure 1 : Arbre maximum des éléments caractérisant le changement climatique (N=60), basé sur l'analyse des questionnaires « Similitude ».

5-Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme VMC (projet VULSACO, n° ANR VMC06-009). Les auteurs remercient U. Badorc, S. Capo, P. Fattal, et J.-P. Parisot pour leurs contributions aux ateliers, ainsi que les parties prenantes ayant participé à ce travail.

6-Références

Doise, W. (1982). *L'explication en psychologie sociale*. Paris: Presses Universitaires de France.

Dupuy, J.-P. (2008). *Expertiser par gros temps.* Actes du colloque "Risques & Expertise", Conseil général de l'environnement et du développement durable - MEEDDM, pp. 8-17, Paris 20 novembre 2008.

Idier, D., Balouin, Y., Bertoldo, R.B., Bouchette, F., Boulahya, F., Brivois, O., Calvete, D., Capo, S., Castelle, B., Certain, R., Charles, E., Chateauminois, E., Delvallée, E., Falquès, A., Fattal, P., Larroudé, Ph., Lecacheux, S., Garnier, R., Héquette, A., Le Cozannet, G., Maanan, ., Mallet, C., Maspataud, A., Mays, C., Oliveros, C., Paillart, M., Parisot, J.-P., Pedreros, R., Poumadère, M., Robin, N., Ruz, M.-H., Robin, M., Thiébot, J. (2010) *Vulnérabilité des systèmes côtiers sableux face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques: méthodes, outils, résultats et enseignements.* Journées "Impacts du changement climatique sur les risques côtiers", 15 & 16 novembre 2010, Orléans.

Scano, S., Junique, C. & Vergès, P. (2002). *Ensemble de programmes permettant l'analyse des évocations, EVOC2000. Manuel d'utilisateur.* Aix-en-Provence.

Junique, C., Barbry, W., Scano, S., Zeliger, R. & Vergès,P. (2002). *L'analyse de similitude de questionnaires et de données numériques, SIMI2000. Manuel d.utilsateur*. Aix-en-Provence.

Reinert, M. (1998). *Alceste: Analyse de données textuelles. Manuel d'utilisateur.* Toulouse: IMAGE.





ANCORIM

Atlantic network for coastal risks management

Réseau atlantique pour une meilleure gestion et prévention des risques côtiers

Projet européen Interreg IVB Espace atlantique

Florence Bouteau, Directrice du projet européen ANCORIM, florence.bouteau@aquitaine.fr
Isabelle Dévé, Coordinatrice du projet européen ANCORIM, isabelle.deve@aquitaine.fr

Contexte

Une vulnérabilité commune aux régions littorales atlantiques

Les 33 régions européennes de la façade atlantique comptent environ 70 millions d'habitants. La bande côtière de 10 km couvre une surface totale de 194 197 km², pour un linéaire côtier de 2 500 km. Ces régions sont caractérisées par leur forte identité, construite sur la proximité de l'océan, qui détermine une forte tradition d'ouverture internationale, un réel potentiel économique, un riche complexe de systèmes naturels.

Ces zones côtières doivent faire face à plusieurs menaces qui accroissent leur vulnérabilité :

- les contrastes internes entre des zones en dépeuplement et des zones en développement rapide
- les fortes pressions sur les systèmes côtiers (saisonnières liées au tourisme et de l'urbanisation)
- une érosion côtière active affectant la stabilité du trait de côte sur les littoraux meubles, et menaçant les défenses côtières des façades urbanisées.
- les risques induits par les conditions naturelles et les évènements climatiques extrêmes
- les menaces sur la qualité des eaux induites par les rejets agricoles et industriels

La volonté de protection des paysages et du patrimoine naturel constitue donc un élément partagé et fédérateur dans l'appartenance à l'espace atlantique.

L'adaptation au changement climatique: une préoccupation grandissante

Ces différentes pressions sont potentiellement accentuées par les effets pressentis du changement climatique, abordés dans le Livre vert présenté en juin 2007 par la Commission européenne, et par les différents travaux du Groupe II du GIEC (2007 - quatrième rapport).

Certains secteurs d'activité économique sont directement vulnérables, parmi lesquels ceux dépendant des ressources naturelles renouvelables (pêche, aquaculture, agriculture) et ceux dépendant de l'attractivité paysagère et récréative comme le tourisme balnéaire.

Des enjeux transnationaux

Le rapport d'évaluation de la GIZC en Europe (août 2006) concluait au sujet de l'espace atlantique: «Contrairement aux autres mers d'Europe, aucune politique régionale commune visant à mettre en évidence et analyser les problèmes et questions au niveau régional n'est en place pour la côte Atlantique». ANCORIM permet d'effectuer un pas vers une plus forte mutualisation des expériences et connaissances à l'échelle de l'arc atlantique, de partager

l'information et les ressources disponibles, et de formaliser collectivement, en fonction des compétences et domaines d'expertise de chacun, de nouvelles réponses et outils d'aide à la décision. Il résulte ainsi des réflexions du groupe de travail « environnement et gestion intégrée des zones côtières » de la Commission Arc Atlantique de la CRPM**.** Il répond à la volonté partagée par tous de mettre en œuvre une démarche concrète de coopération sur la prévention et la gestion opérationnelle des risques naturels côtiers**.**







Objectifs

L'objectif du projet
Le projet se propose de contribuer au **renforcement des capacités d'action des acteurs du littoral** des régions atlantiques en matière de gestion et prévention des risque côtiers, compte tenu, notamment, du facteur aggravant du changement climatique. Il s'adresse donc en priorité aux gestionnaires et décideurs du littoral ainsi qu'à la communauté scientifique. Le projet intervient en termes de mise en réseau, mutualisation, communication et animation, pour une meilleure sensibilisation et mobilisation des acteurs et afin de leur fournir des outils opérationnels pour la prise de décision en matière de prévention et de lutte contre les risques côtiers.
ANCORIM permet de **mettre en réseau** les connaissances, les outils et les compétences entre différentes régions européennes de l'espace atlantique et de mutualiser ainsi les ressources. La problématique des risques côtiers étant commune aux différents territoires concernés, tout en ayant des manifestations diverses, il s'avère utile de promouvoir l'échange d'expériences, de faire circuler les informations et de contribuer à fournir un même référentiel commun pour la gestion intégrée des zones côtières de l'espace atlantique. Le projet n'est donc pas axé sur la production de nouvelles données scientifiques, mais plutôt sur l'adaptation et la valorisation des données existantes afin de les rendre accessibles et utilisables aux gestionnaires du littoral.
Cette optique amène également le projet à se pencher sur **la réalisation d'outils didactiques**, afin de pallier à la difficulté de compréhension et d'utilisation opérationnelle de données et outils scientifiques, certes disponibles mais souvent difficilement interprétables par un public non expert. Pour cette raison, le partenariat repose sur des binômes d'autorités publiques et scientifiques (universités, laboratoires, centres de recherche), permettant ainsi de créer ou de renforcer les passerelles entre les acteurs impliqués dans la lutte contre les risques côtiers.
Le projet se propose également **d'explorer les futurs possibles** des territoires et des activités économiques côtières au travers de démarches prospectives, menées sur la base de scénarii conduits sur des études de cas. Ces études doivent conduire à identifier des solutions alternatives aux problèmes posés et concourront à sensibiliser des publics ciblés par le projet en matière de gestion adaptative des littoraux et de prévention des risques.
Le projet implique **l'ensemble des parties prenantes** de la gestion intégrée des zones côtières dans les régions partenaires, en sollicitant progressivement une dynamique de communication et d'échanges entre différentes catégories d'acteurs: élus et services techniques des collectivités, associations, secteur privé et chambres consulaires, corporations et organisations socioprofessionnelles, communautés scientifiques et techniques, pôles de recherche, centres de ressources travaillant sur les problématiques littorales et centres de formation des acteurs du territoire.

Le thème de la **gouvernance** est donc au cœur du projet : celui-ci rassemble en effet des partenaires provenant aussi bien de collectivités locales que d'organismes scientifiques, dans le but de renforcer l'interaction et l'échange entre ces deux typologies d'acteurs dont l'action et l'intervention sont fondamentales pour une gestion efficace des risques côtiers.

Méthodologie d'intervention

Le projet se structure autour de **3 grandes problématiques** (traduites en workpackages/WP ou groupes de travail thématiques) :

- érosion et stabilité du trait de côte (WP4)
- qualité des eaux côtières en relation avec les activités économiques (WP5)
- aménagement des territoires littoraux ruraux et urbains (WP6).

Pour chacune des thématiques identifiées, le projet intervient de la manière suivante :

- mise en évidence des besoins des décideurs et gestionnaires du littoral en matière d'accès et d'utilisation de l'information scientifique, à travers une enquête réalisée au sein des sept régions partenaires du projet ;
- inventaire des principales ressources scientifiques et techniques existantes dans l'espace atlantique susceptibles de constituer un appui à la décision pour la gestion des risques côtiers ;
- réalisation d'outils innovants permettant de diffuser et de communiquer des informations essentielles à un public non scientifique ;
- mise en œuvre d'études de cas dans différents territoires pilotes du projet ;
- réalisation d'outils et d'activités de communication afin de fournir aux destinataires du projet un ensemble de résultats d'aide à la décision et de renforcer la collaboration entre gestionnaires du littoral et communauté scientifique.

Les 3 WP thématiques ci-dessus sont encadrés et supportés par deux WP transversaux permettant de mutualiser et de fédérer l'effort de communication, de capitalisation, de production d'outils communs au service de la cohérence du programme (WP2 et 3).
Le WP 1 est consacré à la préparation du projet.

Calendrier de mise en œuvre

Le projet a démarré le 1er mai 2009. La phase opérationnelle s'articule de la manière suivante :

1ère année (septembre 2009 – juillet 2010)

- inventaire des ressources scientifiques et techniques à l'échelle des régions impliquées dans le projet et concernant les trois thématiques concernées : érosion et mobilité du trait de côte ; qualité de l'eau et impact sur les activités économiques ; aménagement du territoire littoral ;
- création d'un annuaire des décideurs/gestionnaires du littoral à l'échelle des régions partenaires ;
- enquête des besoins des décideurs en matière d'accès et d'utilisation de l'information scientifique;
- création du site Internet ANCORIM, et intégration en ligne des informations récoltées.

2ème année (août 2010-juillet 2011)

- réalisation d'outils innovants pédagogiques pour les gestionnaires du littoral et transfert en ligne ;
- réalisation d'études de cas dans les différents territoires participant au projet pour l'échange d'expériences, l'expérimentation d'approches innovantes et/ou la définition de scénarios prospectifs, et transfert sur le site Internet des rapports d'études de cas.

3ème année (août 2011 – avril 2012)

Activités de communication et diffusion des résultats, animation du réseau d'experts : séminaires nationaux, conférence finale.

Le partenariat

Chef de file : Conseil régional d'Aquitaine (France)
Partenaires : BRGM (France), CREAA (France), IAAT Poitou-Charentes France), Conseil régional de Bretagne (France), Cap l'Orient agglomération (France), LNEC (Portugal), Université de Coimbra (Portugal), IHRH (Portugal), Diputacion provincial a Coruna (Espagne), CETMAR (Espagne), Université de Vigo (Espagne), Udaras na Gaeltechta (Irlande), Mayo County Council (Irlande), NUIG (Irlande).
Partenaires associés : GEOS (France), IFREMER (France), Administraçao de Regiao Hidrografica do Centro (Portugal), Xunta de Galicia (Espagne).

Résultats escomptés

Résultats qualitatifs
ANCORIM facilite l'accès pour les décideurs et gestionnaires du littoral :

- à ***un réseau de compétences et d'expertises spécialisées sur l'espace atlantique*** et ciblées dans les différents domaines liés à la prévention et la gestion des risques littoraux. Sept régions européennes sont en effet représentées, provenant de quatre pays (Espagne, France, Irlande, Portugal) ; différents types d'acteurs prennent une part active aux activités : 4 Autorités régionales, 3 Autorités locales, 2 Agences publiques, 6 Universités ou centres de recherche, 1 centre de formation, 2 organisations sans but lucratif, 1 entreprise privée. L'ensemble de ces acteurs travaille en intégrant la gestion intégrée des zones côtières et la mutualisation de leurs expériences et compétences constitue une ressource importante dans une optique de mise en réseau des expertises.

- à ***une information scientifique de qualité, traduite et interprétée pour un public non expert,*** au travers d'outils innovants contribuant au renforcement des capacités des différents acteurs du littoral ;
- à ***une plus grande connaissance de la perception des risques de la part des gestionnaires et décideurs*** du littoral et à une meilleure priorisation des activités de communication et d'appui à la décision s'avérant nécessaires ;
- à ***des bonnes pratiques sur la prévention/gestion des risques*** dans les domaines abordés par le projet, présentant des solutions développées dans certains des territoires partenaires et éventuellement transférables dans les situations locales;
- à ***l'échange d'expériences*** dans un cadre transnational ;
- à ***une série d'études de cas prospectives*** avec recherche de solutions alternatives face aux problèmes identifiés dans les domaines abordés par le projet ;

Pour la communauté scientifique, le projet permet d'identifier les domaines dans lesquels l'information scientifique existante est encore insuffisante, et donc de mieux orienter les questions de recherche pour répondre à une demande précise. Il leur sera également possible d'identifier les difficultés ou lacunes existantes en matière de communication envers les gestionnaires, permettant ainsi d'améliorer les pratiques existantes.
Au travers de la mise en réseau des compétences et des initiatives, le projet permet également de contribuer à faciliter de nouveaux partenariats de recherche et synergies transnationales entre laboratoires, centres de recherche, universités.

Résultats quantitatifs

ANCORIM permet la réalisation d'outils d'appui à la décision pour la prévention et la gestion des risques côtiers :

- ***un site Internet dédié au projet ANCORIM*** mettant à disposition des utilisateurs les différents outils du projet, à contenu technique et méthodologique. Le site est disponible en quatre langues et s'adresse aussi bien aux décideurs du littoral qu'à la communauté scientifique. Il est enfin bien entendu l'outil principal du réseau ANCORIM initié pendant le projet et destiné à s'étendre ;
- ***un inventaire des principales ressources scientifiques et techniques*** existantes dans l'espace atlantique susceptibles de constituer un appui à la décision pour la gestion des risques côtiers. L'inventaire permet d'accéder à différentes typologies de ressources : acteurs, projets, études, réseaux, sites Internet, législation. Il est disponible en quatre langues et recense les données présentes dans les régions partenaires d'Ancorim, voire au-delà à l'échelle nationale et européenne. Il n'a pas vocation à être exhaustif mais à être continuellement mis à jour et enrichi ;
- ***un annuaire des acteurs du littoral*** recensant les gestionnaires et décideurs du littoral dans les différentes régions partenaires du projet ;
- ***des outils innovants*** conçus pour la transmission d'informations scientifiques essentielles à la prévention et gestion des risques côtiers à l'attention d'un public non scientifique ;
- ***des études de cas*** mises en œuvre dans différents territoires pilotes du projet, illustrant des cas concrets d'analyse et de prévention des risques, avec la mise en évidence d'éléments de transférabilité potentielle à d'autres contextes européens en matière scientifique et de gouvernance.

L'Observatoire de la Côte Aquitaine, un exemple d'outil partenarial contribuant au suivi et à l'analyse de l'impact du réchauffement climatique sur le littoral

Cyril Mallet[1], Sandrine Aubié[2], Julie Mugica[3] et Anaïs Hoareau[4]

BRGM, Service Géologique Régional Aquitaine,
Europarc, 24 avenue Léonard de Vinci, 33600 Pessac
[1] c.mallet@brgm.fr, [2] a.aubie@brgm.fr, [3] j.mugica@brgm.fr, [4] a.hoareau@brgm.fr

Introduction

La façade atlantique aquitaine s'étend sur plus de 270 km, de l'embouchure de l'Estuaire de la Gironde, au nord, à celui de la Bidassoa, au sud. C'est un environnement naturellement riche et relativement préservé, mais également fragile, dont il est nécessaire d'assurer une gestion et une protection efficaces et durables. A cette fin, l'Observatoire de la Côte Aquitaine a été mis en place dès 1996. C'est un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement du littoral aquitain. Il est financé par : l'Europe (FEDER), l'Etat, la Région Aquitaine, les Conseils Généraux de la Gironde, des Landes, des Pyrénées Atlantiques, le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon, le BRGM et l'ONF.

Ses principales missions, coordonnées avec le GIP Littoral Aquitain et le Réseau de Recherche Littorale Aquitain, concernent la collecte auprès d'organismes locaux et la production (réseau de mesures sur le terrain) de données relatives au littoral (géomorphologie, hydrogéologie, biodiversité, qualité du milieu). Il est également responsable de la diffusion et de la communication de ces données (mise à disposition des données, cf. http://littoral.aquitaine.fr), répondant aux exigences de la Directive Cadre Européenne INSPIRE. Enfin, l'Observatoire s'appuie également sur les connaissances développées à partir de ces données afin d'émettre des avis techniques en soutien aux partenaires et collectivités et conduit des analyses en lien avec la recherche fondamentale (ex. : altération des roches, caractérisation du « trait de côte » en 2020 et 2040, modélisation de houle…). Compte tenu du concept de résilience côtière défini dans l'étude EUROSION (2004), l'acquisition de données environnementales sur le long terme est d'une importance majeure dans la démarche de GIZC menée par l'Observatoire.

A l'échelle européenne, l'Observatoire de la Côte Aquitaine est un partenariat exemplaire (Figure 7) dont la mise en œuvre a été recommandé dans l'étude EUROSION (2004) : *« À l'échelle régionale et locale, la production, le traitement, le stockage, l'actualisation, l'échange et la diffusion de l'information pertinente sur les processus de l'érosion côtière devraient être considérés comme des exigences fondamentales pour assurer des opérations réussies dans la gestion de la ligne de côte. Les autorités régionales devraient jouer un rôle de premier plan dans la création des conditions institutionnelles et techniques adéquates […] Cette stratégie ne devrait pas se limiter à la gestion de la ligne de côte, mais s'étendre au contexte plus large de la gestion intégrée de toute la zone côtière ».*

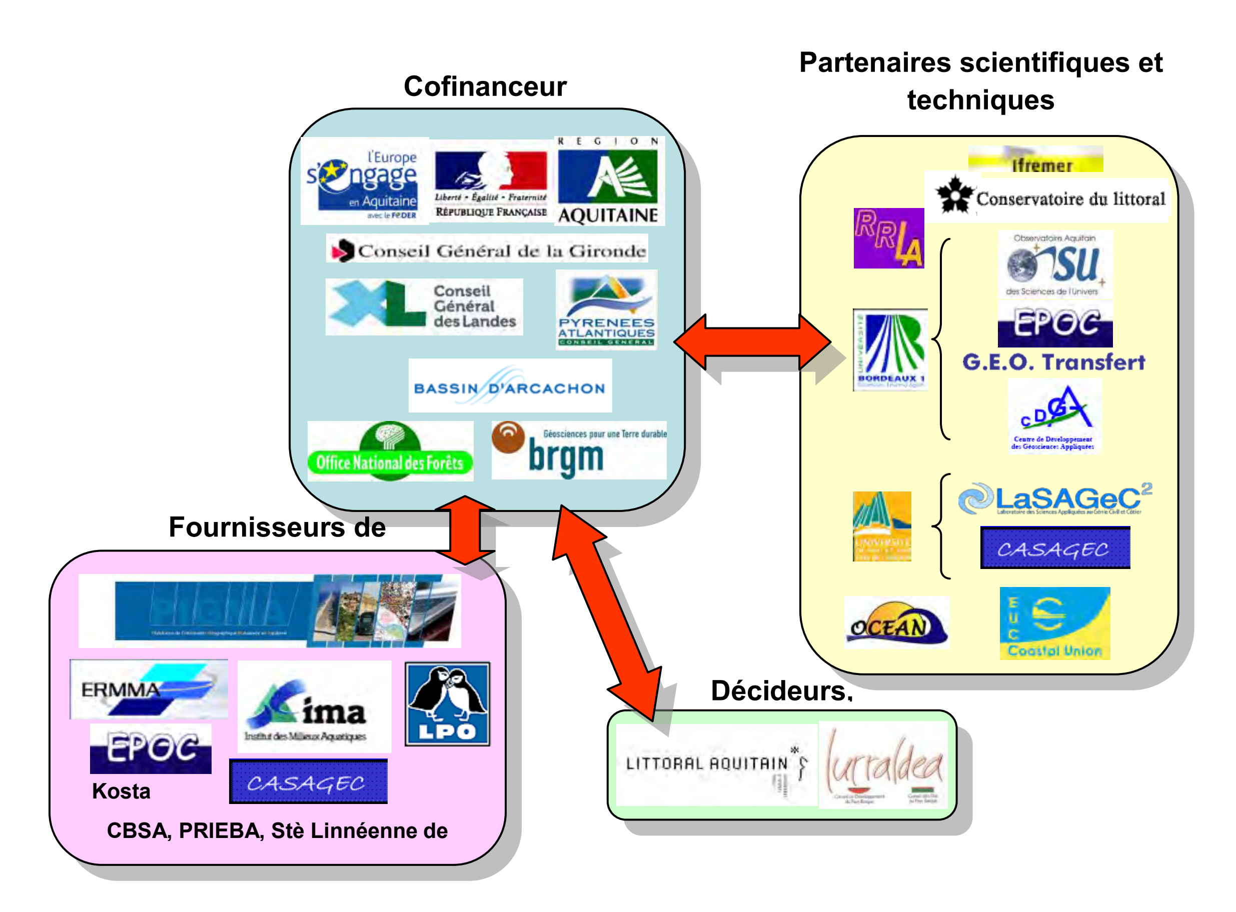


Figure 7 : Le partenariat mis en œuvre dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine

Collecte de données et réseau de mesures

En tant que centre de ressources, l'Observatoire de la Côte Aquitaine collecte des informations environnementales (SIG, données de biodiversité faune, flore, qualité du milieu) issues d'organismes locaux, spécifiques à des milieux littoraux (côte rocheuse, côte sableuse, Bassin d'Arcachon). Il opère également des mesures régulières et des observations scientifiques et techniques relatives aux aléas érosion côtière, mouvements de terrain, submersion marine... Les principaux indicateurs suivis concernent l'évolution géomorphologique de la côte (trait de côte, forme de plage et de dune, limites de végétation), les agents dynamiques (houle, vent, etc.) et les aménagements (ouvrages de protection, DPM, etc.). En exemple, la Figure 8 présente l'évolution du trait de côte entre 1966 et 2008 déduite des données collectées (photos aériennes, images satellites) et des suivis effectués sur le terrain.

La connaissance des processus environnementaux peut être limitée par :

- la fréquence inadaptée de production de données (ex : besoin de mettre à jour le géoréférencement des ouvrages de protection) ;
- l'absence de donnée dans certaines zones géographiques (ex : absence de bathymétrie dans les zones de petits fonds) ;
- la durée insuffisante (ex : données de houle et de vent disponibles trop récentes) ;
- etc…

En fédérant la collecte et la production d'informations environnementales puis en les diffusant, l'Observatoire de la Côte Aquitaine s'efforce donc d'assurer une continuité et une cohérence régionale dans l'acquisition de ces données indispensables à la démarche GIZC dans le contexte de changement climatique.

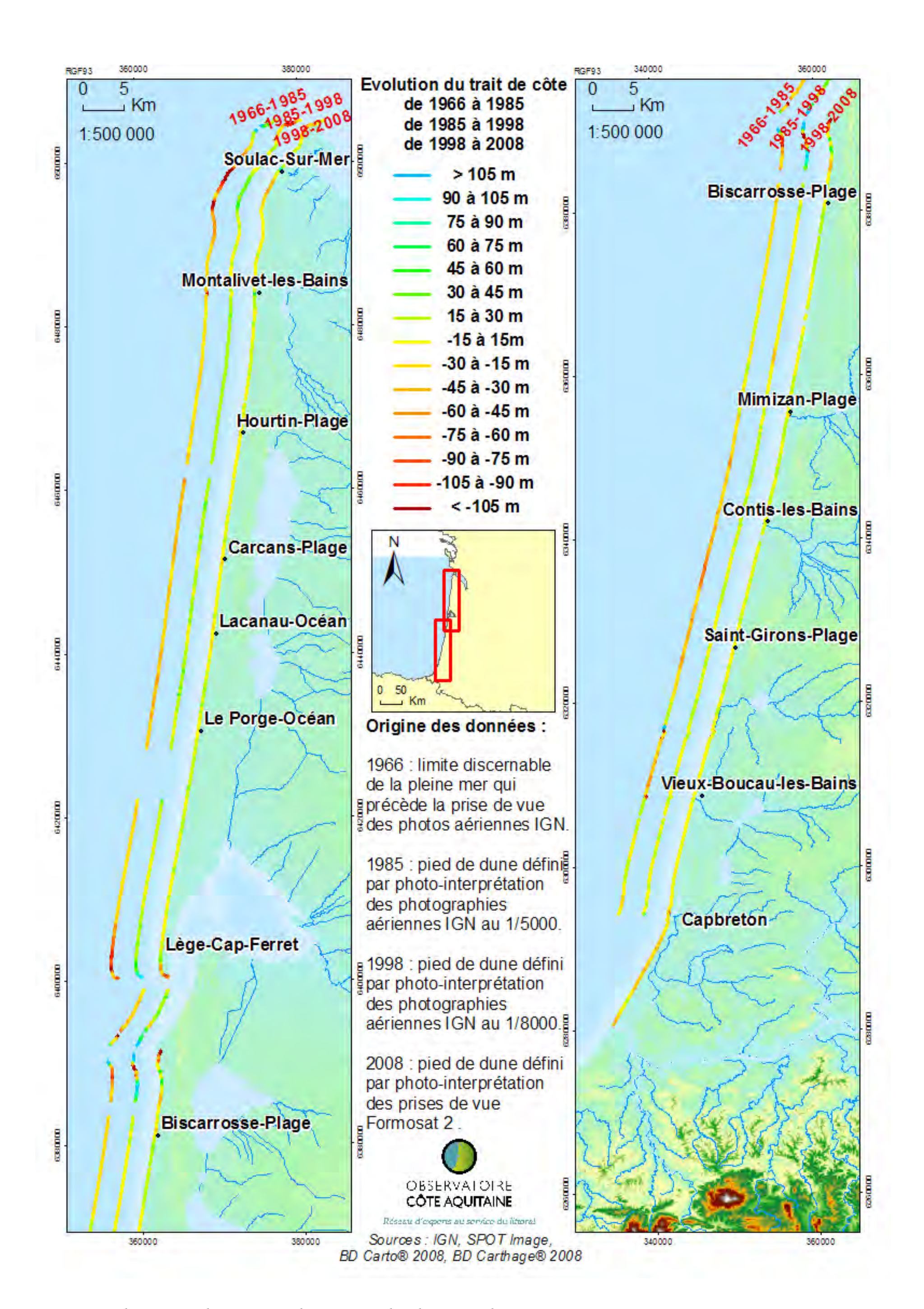


Figure 8 : Evolution du trait de côte du littoral aquitain entre 1966 et 2008.

Analyse des données pour la gestion du littoral

En plus de son rôle de centre de ressources, l'Observatoire de la Côte Aquitaine a pour mission de soutenir les partenaires et les collectivités dans la gestion du littoral. Il est ainsi amené à émettre des avis techniques portant sur : des aménagements, des ouvrages de protections, des événements de tempête et de submersion marine, des pollutions …

Pour cela, l'Observatoire s'appuie sur les connaissances élaborées et réalise des analyses en lien avec la recherche fondamentale :

– étude stratégique de l'évolution du trait de côte sur le littoral aquitain en 2020 et 2040 pilotée par le GIP littoral aquitaine et en collaboration avec le laboratoire EPOC (Université Bordeaux 1) ;

– modélisation numérique pour caractériser l'aléa submersion marine dans le Bassin d'Arcachon (exemple de résultats : Figure 9), collaboration avec le laboratoire EPOC (Université Bordeaux 1) et le CASAGEC (cellule de transfert de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour) ;
– etc…

Les principales difficultés rencontrées par l'Observatoire pour la réalisation de ses expertises sont liées à l'absence d'information sur l'évolution des agents dynamiques sous l'effet du changement climatique. L'évolution des climats de houles ou des périodes de retour de tempêtes par exemple est un paramètre essentiel pour l'estimation de la position du trait de côte dans plusieurs décennies ou pour le dimensionnement d'ouvrage de protection contre la submersion marine par exemple. De plus, des informations sur l'évolution morphodynamique sont indispensables pour la prise en compte de l'élévation du niveau marin, d'où l'importance de développer des modèles prédictifs permettant de simuler la dynamique des milieux côtiers (mobilité des fonds liées aux agents marins) sur de longues échelles de temps (décennales et centennales).

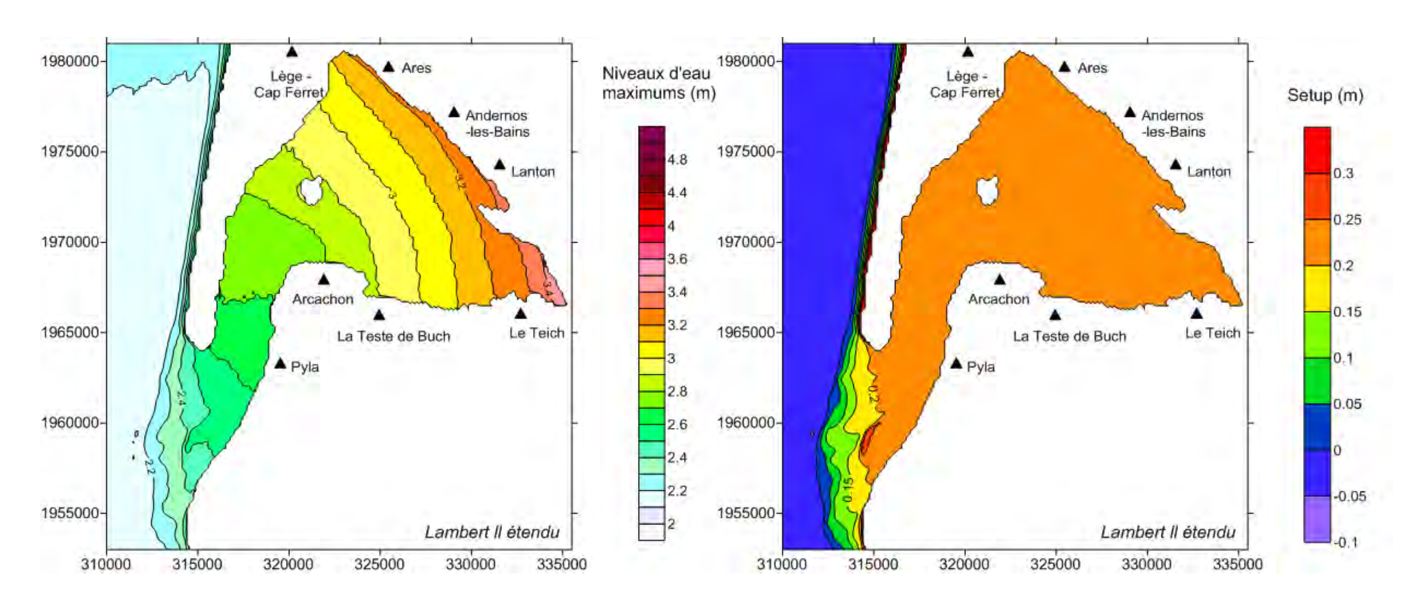


Figure 9 : Application de modèles numériques pour l'estimation des niveaux d'eau dans le Bassin d'Arcachon. Résultat de simulation de l'évènement Klaus (24/01/2009), rapport BRGM/RP-58723-FR

Conclusion

La prise en compte des risques côtiers dans la gestion du littoral aquitain a permis de mettre en place dès 1996 l'Observatoire de la Côte Aquitaine, un partenariat régional exemplaire réunissant gestionnaires, techniciens, chercheurs, etc.. Ses principales missions consistent à collecter des données environnementales sur le long terme et à réaliser des mesures et des observations sur le terrain de manière continue. Il constitue ainsi un outil indispensable pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur le littoral.

L'Observatoire a également pour mission d'aider à la décision les acteurs gestionnaires du littoral en émettant des avis techniques à leur demande. Malgré les connaissances développées grâce aux mesures, la précision des prédictions reste limitée par les difficultés liées à la quantification de l'évolution des agents dynamiques (houle, vent,…) et intrinsèques (stock sédimentaire, altération des roches,…) au cours des prochaines décennies. Il apparaît de ce fait essentiel de développer des modèles prédictifs dont la mise en œuvre pourra s'appuyer sur la considérable base de données alimentée par l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

UNE METHODOLOGIE POUR EVALUER LA VULNERABILITE DES COTES BASSES AUX RISQUES LIES À LA MER

Virginie, Duvat[1], Alexandre, Magnan[2]

[1] UMR LIENSs (LIttoral, Environnement, SociétéS), Université de la Rochelle-CNRS 6250 – Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17 000 La Rochelle, virginie.duvat@univ-lr.fr
[2] Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), Sciences Po – 27, rue Saint-Guillaume 75 007 Paris, alexandre.magnan@iddri.org

Dans le contexte actuel caractérisé par l'exacerbation des risques liés à la mer sous l'effet de facteurs variés (urbanisation et aménagement des espaces littoraux, perturbation de la dynamique côtière, dégradation des écosystèmes « protecteurs » que sont les dunes, les mangroves, etc.) et l'existence de fortes incertitudes sur les impacts à attendre du changement climatique, il semble à la fois important et urgent de répondre aux besoins des responsables politiques et administratifs de disposer de diagnostics globaux directement utilisables pour prendre des décisions d'aménagement et de gestion visant à mieux protéger les enjeux. S'il est nécessaire de réaliser des études complètes à des échelles spatiales fines pour mieux connaître les aléas et la vulnérabilité des sociétés littorales, l'on ne saurait cependant attendre que des connaissances exhaustives soient produites pour mieux gérer les risques côtiers. La tempête Xynthia en a récemment donné une excellente illustration : bien que l'on ne dispose pas de certaines connaissances, notamment de modèles de submersion, il est nécessaire de prendre des décisions et de choisir entre le recul stratégique ou la résistance par le renforcement des ouvrages d'ingénierie. La mise en place de bases de données complètes et l'élaboration de modèles de compréhension des processus et de scénarii de prévision des impacts des événements extrêmes (tempête intense couplée à une marée de vives-eaux, par ex.) prend d'autant plus de temps qu'elle est coûteuse en moyens humains, techniques et financiers. De nombreux pays n'ont pour cette raison-là pas la capacité de s'engager dans de telles démarches. Un autre constat qui peut être fait est celui de l'inadéquation qui existe souvent entre l'échelle de production des données et celle à laquelle se manifestent les besoins des gestionnaires. Dans les espaces insulaires par exemple, de nombreuses données sont établies à des échelles trop petites (île, façade littorale) et sont par conséquent d'une utilité limitée pour gérer les risques.

Face à ces constats et afin de répondre à la forte demande exprimée par les élus et les gestionnaires de disposer d'éléments concrets pour pouvoir mettre en œuvre des politiques de réduction des risques liés à la mer, il semble intéressant de développer des méthodologies d'évaluation globale de la vulnérabilité des côtes basses (les plus exposées) aux risques d'érosion côtière et de submersion marine (Garcia-Mora *et al.*, 2001 ; Harvey et Woodroffe, 2008 ; Abuodha et Woodroffe, 2010). Ce type d'approche permet de fournir dans des délais raisonnables des outils opérationnels (cartes à grande échelle et indicateurs de suivi, en particulier) aux acteurs afin de les aider à définir des zones d'intervention prioritaires et à mettre en œuvre des actions de réduction de la vulnérabilité.

Il s'agira ici de présenter brièvement (1) les fondements de la méthodologie qui a été mise au point par les auteurs, (2) l'application réalisée sur l'île de Tortola dans les Iles Vierges Britanniques, ainsi que (3) les perspectives de recherche qu'ouvrent ces premiers travaux.

Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des côtes basses aux risques liés à la mer

(1) La question de l'échelle spatiale de référence

La perspective d'aide à la décision qui est adoptée ici impose de choisir une échelle spatiale pertinente pour l'action, c'est-à-dire correspondant à un ou à plusieurs périmètres de gestion emboîtés, que le territoire considéré soit sous administration publique ou privée[1]. Cela revient à travailler à grande et à très grande échelle, et à considérer des unités spatiales cohérentes en termes morphologiques (plaine littorale, cellules et sous-cellules sédimentaires, île corallienne) et d'aménagement (foyer de peuplement, zone industrielle...).

(2) Les indicateurs de vulnérabilité des côtes basses aux risques liés à la mer

Neuf indicateurs de vulnérabilité ont été identifiés, qui sont relatifs aux conditions physiques, plus ou modifiées par l'homme (morphologie littorale, processus, degré exposition des enjeux) et à l'aménagement du territoire (exposition et protection des foyers de peuplement, systèmes de production, infrastructures et ressources vitales) (tab. 1).

Indicateurs de vulnérabilité	**Justification**
1. Configuration morphologique	*Les systèmes morphologiques sont plus ou moins sensibles aux phénomènes d'érosion et de submersion selon leur nature (côtes rocheuses ou sédimentaires), leur altitude, leur environnement immédiat (présence ou non de marécages, mangrove...) et leurs dimensions.*
2. Existence d'une "zone de protection"	*Cette notion renvoie à des formations géologiques (beachrocks, plates-formes conglomératiques, remparts de tempête, banquettes de rétention sédimentaire, récif corallien...), à des modes d'aménagement (remblais, îles artificielles...) et à des ouvrages de défense (cordons de tétrapodes, murs de protection...) situés dans les domaines marin et terrestre qui ont pour effet d'amortir les vagues et de réduire leur énergie à la côte, donc de protéger, au moins en partie, les enjeux. .*
3. Degré d'exposition aux agents morphodynamiques	*La position du site considéré par rapport à la direction de provenance des houles de tempête et saisonnières, la découpure du littoral et la présence ou non de terres émergées au devant des côtes (îlots, presqu'îles) jouent un rôle majeur dans l'exposition aux houles.*
4. Évolution du trait de côte	*L'évolution du trait de côte traduit l'état sédimentaire du système considéré et sa tendance évolutive. En situation d'érosion, le risque est accru par le recul du trait de côte. La vulnérabilité est alors optimale.*
5. Modèle d'aménagement du site	*Cet indicateur est évalué sur la base de 4 critères : (a) la surface bâtie (densité des enjeux, aggravation des effets de submersion/inondation par l'imperméabilisation des sols) ; (b) la répartition des enjeux, qui les expose plus ou moins à l'aléa submersion ; (c) leur distance par rapport à la mer, qui détermine leur exposition ; (d) le nombre de bâtiments et infrastructures, qui détermine le niveau d'exposition à partir de classes établies en fonction des situations locales (part du total du district, par ex.).*
6. Degré d'exposition des infrastructures de transport et de production	*Cet indicateur combine l'importance stratégique des infrastructures (importance nationale ou caractère unique pour la desserte du site considéré) et leur niveau d'exposition, qui inclut leur position (altitude, distance par rapport à la mer et aux couloirs de submersion - cours d'eau, mangroves... -) et leur degré de protection par des ouvrages de défense. Ce degré d'exposition correspond aux dommages potentiels, établis à partir d'événements passés et des dommages potentiels, évalués en fonction de la localisation des infrastructures considérées.*
7. Degré d'exposition des ressources vitales, centres de décision et services d'assistance	*Les ressources vitales (eau potable, énergie...), les centres de décision (administration) et les services d'assistance (police, pompiers, hôpitaux...) jouent un rôle fondamental pour la prévention (alerte) ainsi qu'en situation de crise (intervention d'urgence, évaluation, aide aux sinistrés...).*
8. Degré d'exposition du bâti touristique	*Il constitue une part importante des enjeux sur les littoraux.*
9. Degré d'exposition des foyers de peuplement	*Il détermine l'exposition des habitants, du tissu économique et des infrastructures de base.*

Tab. 1 - Indicateurs de vulnérabilité des côtes basses aux risques liés à la mer

[1] (1) périmètres d'intervention sous administration publique : commune, district, région...; (2) périmètres d'intervention sous administration privée : parcelle privée, gérée par un particulier ou par un groupe hôtelier, par exemple.

Pour chacun de ces indicateurs, des niveaux de vulnérabilité sont définis, classés de 0 ou 1 à *n*, qui permettent de calculer un indice synthétique de vulnérabilité et des indices thématiques. Les résultats sont restitués sous deux formes complémentaires : (1) graphique, qui met en évidence les principales causes de la vulnérabilité et permet d'identifier facilement les domaines d'intervention possibles pour la réduire ; (2) cartographique, qui met en évidence les variations spatiales de la vulnérabilité. L'évaluation première établit un état de référence qui peut être actualisé par la suite dans le cadre d'un suivi permettant de mesurer l'évolution globale de la vulnérabilité et l'efficacité des politiques de mitigation menées par les acteurs.

Résultats d'une application aux Iles Vierges Britanniques : l'exemple de Tortola

Seule une partie des résultats cartographiques obtenus à Tortola est présentée ci-après. Différents types de cartes peuvent être produits, des cartes de synthèse qui mettent en évidence les variations spatiales de la vulnérabilité (fig. 1) et des cartes thématiques montrant la variation de la sensibilité des sites, définie comme relevant de leurs seules caractéristiques physiques (fig. 2), ou le degré d'exposition des enjeux (fig. 3). Ces différents types de cartes sont complémentaires pour le gestionnaire : la première donne une vision synthétique des zones à protéger en priorité car elles sont susceptibles de connaître des dommages majeurs en cas d'événement exceptionnel ; la seconde met en évidence les zones basses les plus soumises aux aléas, permettant ainsi de visualiser les plaines qu'il est dangereux d'aménager et qui, lorsqu'elles l'ont été, doivent faire l'objet de mesures de prévention et de protection spécifiques ; la troisième retranscrit la part de la vulnérabilité qui est due aux stratégies d'aménagement du territoire, qu'elle permet du coup d'évaluer.

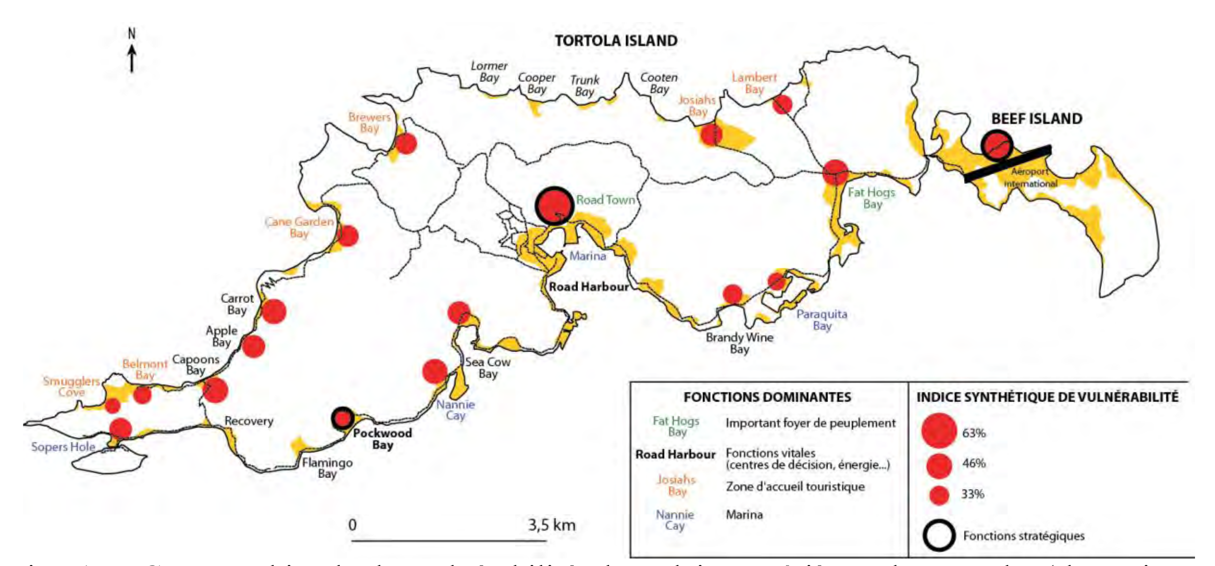


Fig. 1 - Cartographie de la vulnérabilité des plaines côtières de Tortola (Iles Vierges Britanniques) aux risques liés à la mer

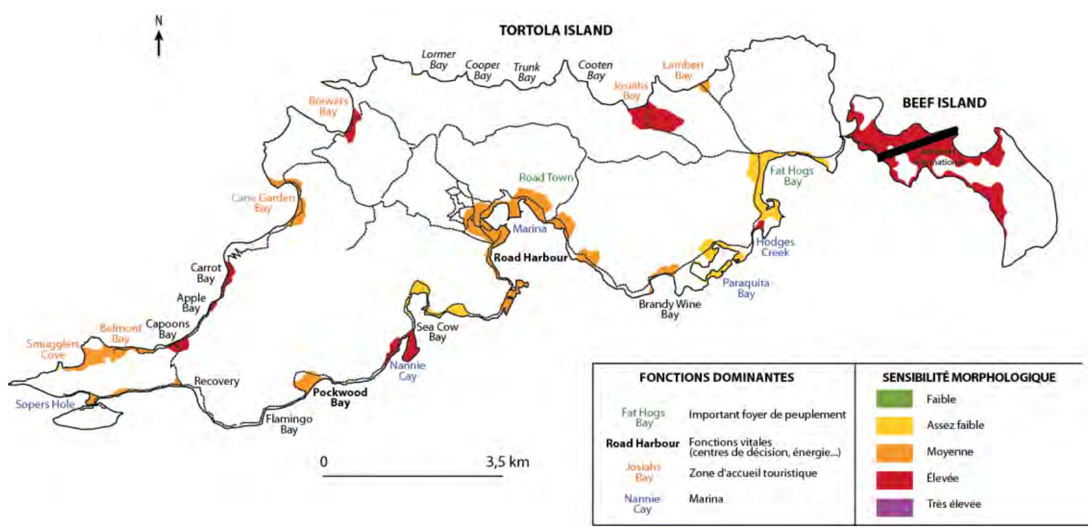


Fig. 2 - Cartographie de la sensibilité morphologique des plaines côtières de Tortola (Iles Vierges Britanniques) aux risques liés à la mer

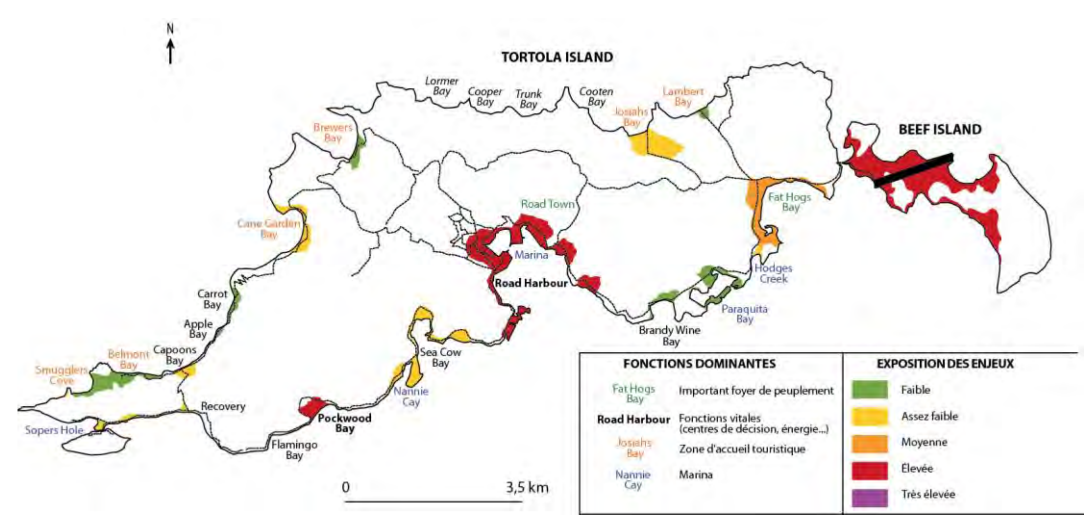


Fig. 3 - Cartographie de l'exposition des enjeux aux risques liés à la mer (Tortola, Iles Vierges Britanniques)

Perspectives de recherche

À ce stade, il semble intéressant : (1) d'affiner la description des critères retenus ; (2) d'intégrer de nouvelles données, comme la perception du risque ou le rôle de l'aide extérieure dans la gestion du risque ; (3) de compléter l'approche engagée par un volet portant sur la capacité de réponse des communautés locales ; (4) de continuer à travailler simultanément sur différents types de terrains pour parvenir à élaborer une trame méthodologique générique qui soit transposable (modulable et adaptable) et qui permette de réaliser des comparaisons.

Références bibliographiques

Garcia-Mora M.R., Gallego-Fernandez, J.B., Williams, A.T., Garcia-Novo, F. (2001). A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of Coast. Research,* 17 : 802-817.

Harvey, N., Woodroffe, C.D. (2008). Australian approaches to coastal vulnerability assessment. *Sustain. Sci.,* 3: 67-87.

Abuodha, P., Woodroffe, C.D. (2010). Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from the southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation,* 14: 189-205.

DU « SYSTÈME DE RESSOURCES » À LA VULNÉRABILITÉ : VERS UN CADRE D'ANALYSE TRANSDISCIPLINAIRE

Alexandre, Magnan[1], Virginie, Duvat[2]

[1] Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), Sciences Po – 27, rue Saint-Guillaume 75 007 Paris, alexandre.magnan@iddri.org
[2] LIENSs (Littoral, Environnement, SociétéS), UMR Université de la Rochelle-CNRS 6250 – Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17 000 La Rochelle, virginie.duvat@univ-lr.fr

Ce texte[1] a pour principale ambition de contribuer à renouveler l'approche classique de la vulnérabilité des territoires littoraux aux risques naturels. La démarche adoptée est originale en ce qu'elle s'appuie sur la notion de « système de ressources », entendue ici comme *l'ensemble des composantes naturelles et anthropiques d'un territoire qui permettent de définir ses forces et ses faiblesses face aux risques naturels, qui elles-mêmes déterminent ses capacités de gestion des perturbations et d'adaptation aux changements*[2]. Le système de ressources mobilise ainsi l'ensemble des caractéristiques physiques et anthropiques des territoires pour en expliquer le fonctionnement. L'approche choisie permet d'expliquer sur des bases concrètes en quoi les risques naturels perturbent un territoire dans son ensemble et mettent en exergue le caractère systémique et dynamique de sa vulnérabilité.
Si les auteurs ne traitent pas ici de la dimension introduite par le changement climatique, ils replacent tout de même leur analyse dans le cadre de la définition du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, selon laquelle la vulnérabilité est « le degré auquel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des [risques naturels], y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des [aléas naturels] auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation ».

Les facteurs de vulnérabilité

L'analyse renouvelée de la vulnérabilité actuelle des territoires s'appuie sur sept catégories de facteurs qui entretiennent de fortes interactions et définissent le « système de la vulnérabilité ». Si les facteurs physiques (1 à 3) ont en général des effets bien définis en ce qu'ils renforcent ou atténuent la vulnérabilité, l'influence des facteurs anthropiques (4 à 7) est plus ambiguë, car grandement dépendante de spécificités locales très variables d'un contexte à un autre.

(1) La configuration territoriale

La configuration du territoire (éclatement des surfaces émergées dans les archipels coralliens, vastes étendues en milieu continental, etc.) représente l'ensemble des caractéristiques physiques de l'espace qui s'évaluent en termes d'opportunités et de contraintes pour le développement. Dans le contexte des risques naturels, cela traduit la propension de l'espace

[1] Il fait la synthèse de travaux des auteurs (Cazes-Duvat, 2001 ; Duvat 2007 ; Magnan, 2009a, 2009b ; Duvat et Magnan, *à paraître*) sur les thèmes de la vulnérabilité des territoires littoraux aux risques liés à la mer et sur la capacité de réponse des sociétés, en incluant la dimension changement climatique. Cela explique que seuls les travaux des auteurs apparaissent ici en bibliographie, chacun d'entre eux renvoyant à une bibliographie plus complète.
[2] Les auteurs n'ont pas connaissance de l'utilisation de cette notion de « système de ressources », ni dans l'analyse des risques naturels passés et actuels, ni dans celle des impacts du changement climatique.

littoral à être affecté par des perturbations, propension qui va dépendre tant de la diversité des aléas que de leur occurrence et de leur l'intensité.
Un élément central renvoie ici à la nature des côtes. Celle-ci retraduit les conditions locales à micro-locales : part de linéaire côtier, proportion de plaines littorales, altitudes, réseau hydrographique plus ou moins ramifié, bassin versant plus ou moins pentu, nature du substrat (plage de sable, côte rocheuse, etc.), densité de la couverture végétale, etc. Ainsi, un même aléa n'induira pas les mêmes impacts partout.

(2) L'exposition aux risques naturels, en particulier liés à la mer
Cette susceptibilité du territoire à être affecté va parallèlement dépendre, à une échelle moins fine, du contexte régional dans lequel se localise l'espace considéré. Ce contexte va en effet jouer sur le(s) type(s) d'aléas qui vont potentiellement affecter le territoire. On sait par exemple, pour être caricatural ici, que les régions polaires ne vont pas être soumises à des cyclones, de même que les tremblements de terre vont survenir dans des zones spécifiques.
Il convient cependant de tenir compte également d'aléas naturels qui ne vont pas dépendre de zones géographiques particulières. C'est le cas des tsunamis, par exemple, qui prennent source dans des régions à activité sismique, mais qui vont avoir des effets bien au-delà de celles-ci. Cela appuie l'idée que différentes échelles spatiales doivent être considérées en même temps.

(3) La sensibilité des écosystèmes et des ressources naturelles
Les îles coralliennes, par exemple, présentent des écosystèmes particulièrement sensibles aux variations des caractéristiques océaniques (température et turbidité de l'eau notamment). Elles disposent par ailleurs de ressources limitées : lentilles d'eau minces, surfaces émergées restreintes, etc.
À l'inverse, de vastes plaines littorales adossées à des espaces continentaux pourront par exemple être dotées de larges réserves d'eau souterraines et, en surface, d'un réseau hydrographique important. Ainsi disposeront-elles d'un potentiel d'aménagement relativement élevé. On sait par ailleurs que les écosystèmes continentaux sont généralement moins fragiles que ceux des îles (problème de l'endémisme), mais aussi qu'ils subissent davantage encore la pression des activités humaines (pollution, par exemple).

(4) Les conditions de vie de la population
Les conditions de vie des populations contribuent à la vulnérabilité des territoires lorsque l'espérance de vie est limitée par un état sanitaire médiocre et/ou par une alimentation pauvre, lorsqu'il existe d'importants retards dans les transports et l'éducation (phénomènes de marginalisation spatiale et sociale), etc.
Néanmoins, et cette remarque vaut pour les facteurs 4 à 7, il faut concevoir l'influence des conditions de vie sur la vulnérabilité comme étant intimement liée à l'ensemble des conditions physiques, environnementales et anthropiques locales. Une population jeune ne sera pas *a priori* ni plus ni moins résiliente qu'une population vieillissante, les notions de rapport au risque et d'expérience des aléas pouvant jouer un rôle plus déterminant que l'âge, par exemple. De même qu'un haut niveau d'éducation ne présage pas forcément de réactions adaptées lors de catastrophes naturelles. En revanche, les conditions sanitaires semblent davantage jouer dans un même sens, quelques soient les autres conditions locales. Ce point soulève l'importance de ne pas considérer les facteurs d'influence de la vulnérabilité isolément les uns des autres, mais au contraire de faire l'effort de les analyser dans leur contexte territorial (synergies et conflits entre les facteurs).

(5) La cohésion sociétale

La solidarité communautaire, qui s'appuie sur la cohésion de la société, permet d'amortir les effets d'une perturbation naturelle à diverses échelles territoriales. Aussi la cohésion sociétale, qui repose sur des bases à la fois culturelles (partage d'une identité, de valeurs culturelles, etc.), sociales (réseaux et mécanismes de solidarité) et économiques (complémentarités entre les secteurs, poids des inégalités, etc.), constitue-t-elle un facteur important de réduction de la vulnérabilité. Cela est d'autant plus vrai dans les pays pauvres que les autorités publiques ont des capacités de gestion et d'intervention souvent réduites. Mais cela est aussi très largement vrai dans les pays industrialisés, par exemple au travers des mécanismes assurantiels. De même que l'on pourra s'interroger sur le poids de l'individualisme dans l'aptitude d'une société dites « développée » à répondre de manière cohérente et coordonnée à une catastrophe naturelle.

Enfin, nuançons ici aussi en rappelant qu'il faut absolument se garder d'établir une relation systématique entre un fort niveau de cohésion sociétale et une faible vulnérabilité du territoire, car des effets de seuil peuvent jouer. Une forte cohésion communautaire peut par exemple amener une communauté à s'enfermer dans une approche autocentrée de la gestion des perturbations. Or, l'expérience d'autres, et quelques fois leur aide, peuvent être utiles pour sortir de ou éviter la crise.

(6) La diversification des activités économiques et de subsistance

Ici, l'hypothèse sous-jacente est la suivante : un territoire construit sur le modèle de la monoactivité aura d'autant plus de mal à se remettre d'une crise ayant lourdement affecté ce secteur dominant qu'il n'existe pas d'autres secteurs économiques ou d'autres activités susceptibles de jouer un rôle compensatoire (en termes de revenus nationaux et locaux, d'approvisionnement en nourriture, de disponibilité d'emplois, de moyens de production…).

(7) L'organisation politique et institutionnelle

Ce septième facteur d'influence renvoie aux mécanismes qui régissent le fonctionnement du territoire et qui expliquent que les diverses circonscriptions qui le composent (portions de côtes, arrière-pays, zones urbaines, communes, régions…) sont plus ou moins reliées les unes aux autres. Plus un micro-territoire fera face seul à une catastrophe naturelle, plus les conséquences de celle-ci risquent de durer dans le temps, faute de ressources extérieures venues en renfort d'une dégradation partielle des ressources du territoire touché. Parallèlement, et c'est là encore une preuve de l'ambiguïté de l'influence des facteurs d'ordre anthropique, des effets dominos peuvent aussi jouer, amenant les problèmes à l'échelle d'un micro-territoire à se répercuter à des échelles plus larges, et inversement. Ces cas de figure, s'ils sont très contrastés, mettent en avant l'idée de « cohérence territoriale », qui rappelle celle de « cohésion sociétale ».

Une fois encore, insistons sur la nécessité de considérer ensemble, dans une approche systémique, ces sept grandes familles de facteurs d'influence de la vulnérabilité. Ceci nous invite alors à placer la notion de « système de ressources » au cœur de la vulnérabilité.

Le système de ressources est au cœur de la vulnérabilité

La diversité des facteurs qui interviennent dans la vulnérabilité d'un territoire invite à définir ce dernier comme un « système de ressources » produit et géré par les sociétés. Sa vulnérabilité tient, par-delà ses caractéristiques intrinsèques, à la nature des interactions qui s'organisent entre les composantes de ce système. Il s'agit bien ici d'inscrire l'analyse de la vulnérabilité dans une approche globale (prise en compte de l'ensemble des composantes territoriales), systémique (analyse de leurs interactions) et dynamique, en considérant tout état

(morphologique, écologique, sociétal, économique...) comme étant momentané, car perpétuellement en évolution.
Certaines interactions résultent d‘effets d‘enchaînement d‘ordre physique, comme c‘est le cas entre morphologie, processus naturels en jeu (ces deux paramètres s‘influençant mutuellement), niveaux de ressources et exposition aux aléas. Elles résultent aussi des relations entre les facteurs anthropiques (conditions de vie/cohésion sociétale/organisation politique, par ex.). Une troisième interface enfin concerne les interrelations homme/milieu, dont l‘analyse permet d‘appréhender la durabilité des modes de développement. Les modalités d‘aménagement du territoire et de développement ont par exemple des effets majeurs sur la morphologie, l‘état des écosystèmes, l‘évolution des ressources et l‘exposition des sociétés aux aléas naturels. Cela se répercute ensuite sur les sociétés humaines, en affectant le capital de ressources qu‘elles utilisent pour se développer : habitations déplacées suite au recul du trait de côte, pollution des lentilles d‘eau, problèmes sanitaires induits, ravages des cultures, destruction des flottes de pêche, etc.
Cette perspective globale, systémique et dynamique, si elle complexifie le problème s‘impose néanmoins comme incontournable. L‘on passe ainsi de l‘analyse du « système de ressources » à celle du « système de la vulnérabilité », ce qui implique que toute stratégie de réduction de la vulnérabilité (actuelle et future) passe nécessairement par la consolidation du système de ressources.

Références bibliographiques

Cazes-Duvat, V., 2001, Le poids des contraintes physiques dans le développement des atolls : l‘exemple de l‘archipel des Maldives (océan Indien), *Les cahiers d'Outre-Mer,* 53, pp. 3-26.

Duvat, V., 2007, *Les littoraux coralliens des petites îles de l'océan Indien (Mascareignes, Seychelles, Maldives)*. Volume 1 – *Géomorphologie*, Institut Océanographique, Paris, Coll. *Océanis,* 31, 1/2, pp. 1-194 ; volume 2 – *Aménagement et gestion*, 31, 3/4, pp 195-240.

Duvat V., Magnan A., *à paraître en 2010/2011*. Des archipels en péril ? Les maldives et les Kiribati face au changement climatique. *VertigO*, numéro spécial : « *Les petits territoires insulaires face aux changements climatiques : vulnérabilité, adaptation et développement* ».

Magnan, A., 2009a, La vulnérabilité des territoires littoraux au changement climatique : mise au point conceptuelle et facteurs d‘influence, *Analyse Iddri*, 1 [En ligne] URL : http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/An_0901_A.Magnan_Vulnerabilite.pdf).

Magnan, A., 2009b, Proposition d‘une trame de recherche pour appréhender la capacité d‘adaptation au changement climatique, *VertigO*, 9, 3 [En ligne] URL : http://vertigo.revues.org/9189.

RENFORCEMENT DES OUVRAGES SITUES EN FAIBLES PROFONDEURS VIS-A-VIS DE LA MONTEE DU NIVEAU DES MERS

Philippe Sergent[1], Guirec Prevot[1] et Céline Trmal[2]

[1]Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
2, boulevard Gambetta – BP 60039- 60321 Compiègne cedex – France
Philippe.Sergent@developpement-durable.gouv.fr
Guirec.Prevot@developpement-durable.gouv.fr

[2]CETE Méditerranée - Pôle d'activités Les Milles
Avenue Albert Einstein - CS 70499 – 13593 - Aix-en-Provence Cedex 3
Celine.Trmal@developpement-durable.gouv.fr

Résumé :

L'une des premières conséquences du changement climatique est la remontée du niveau moyen des mers. L'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) envisage une hypothèse extrême d'augmentation d'un mètre de ce niveau à l'horizon 2100. L'augmentation du niveau moyen des mers influera sur le déferlement bathymétrique en zone côtière conduisant à des conditions de houles plus fortes à la côte. Ces conditions plus sévères se traduiront par une réduction de la stabilité des enrochements des digues à talus et par des franchissements plus conséquents. La modification du climat de houle à l'ouvrage est due principalement à la hausse du niveau moyen. Les ouvrages situés en faibles profondeurs y seront les plus sensibles. Par exemple, en très faibles profondeurs (ouvrages de haut de plage par exemple), si une hausse d'un mètre du niveau d'eau moyen doit se produire, ces ouvrages devront être rehaussés de deux à trois mètres pour conserver la même performance en termes de franchissement. En outre, ces ouvrages subiront une augmentation des dommages non négligeables. Par exemple, pour conserver les mêmes conditions de stabilité, les blocs des ouvrages situés en très faible profondeur peuvent voir leur masse plus que doubler.

Introduction

Le changement climatique caractérisé en mer par la remontée du niveau moyen et le changement de la houle au large va avoir un impact sur la fonction des ouvrages, leur stabilité mécanique et la sécurité des biens et des personnes. Schématiquement, avec l'augmentation progressive des dommages, les maîtres d'ouvrage vont adopter les options suivantes: a) réparer les digues à l'identique, b) renforcer les digues existantes, c) reconstruire les digues avec un nouveau dimensionnement et avec éventuellement un nouveau mode d'occupation et d) enfin démolir l'ouvrage et se replier. Lebreton et Trmal (2009) [1] ont étudié l'impact du changement climatique sur les ouvrages à l'aide d'un modèle numérique de propagation de houle. Nous proposons ici une première approche analytique du problème en utilisant la formulation de Goda [2] pour la houle en pied d'ouvrage. Nous allons de plus jusqu'à proposer et évaluer les solutions de renforcement. Ces solutions doivent être testées plus précisément ensuite dans le cadre du projet SAO POLO du programme GICC – Gestion et Impact du Changement Climatique. Dans cet article, nous présentons d'abord la géométrie des ouvrages étudiés ainsi que les formules de dimensionnement utilisées. Nous estimons ensuite l'impact du changement climatique sur ces ouvrages avant d'étudier enfin le renforcement à adopter pour conserver le même niveau de performance.

Fonctions
Nous nous intéressons ici aux digues portuaires ou côtières de type digue à talus en enrochements (perméable) ou de type perré (imperméable). Ce sont des structures rencontrées en faibles profondeurs. Elles sont utilisées d'une part dans les ports afin de garantir des conditions de navigation acceptables en réduisant la houle et les transports sédimentaires (les coûts de dragage doivent être réduits) et d'autre part en zone côtière en protection d'infrastructures comme les routes, industries, centrales nucléaires, zones d'habitation,...



Figure 1 : Les deux fonctions principales.

Dimensionnement
Le changement climatique modifie le dimensionnement d'une digue à talus principalement pour les processus suivants : la stabilité des blocs de la carapace, le franchissement et la stabilité du mur de couronnement (non traité ici). Les paramètres intervenant dans ce dimensionnement sont les suivants : la pente des fonds (*m*), la profondeur en pied d'ouvrage (*h*), la hauteur significative de houle avec approche statistique (H_s) ou spectrale (H_{m0}) et la pente de la structure (*a*).

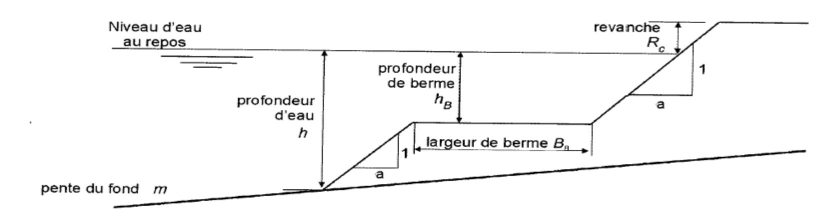


Figure 2 : Définition des paramètres principaux, figure extraite du Guide enrochement [2].

Pour une digue à talus en enrochements, nous retenons la formule TAW (2002) [3] pour le calcul des franchissements en très faibles profondeurs. Ces équations utilisent des facteurs de correction pour une berme (γ_b), les caractéristiques des blocs (γ_f), le type de couronnement (γ_v), et l'angle d'attaque des vagues (γ_β). Les solutions pour réduire le franchissement consistent notamment à ajouter une berme, à modifier le couronnement et à changer les caractéristiques des blocs. Les formules les plus utilisées en ce qui concerne la stabilité de la carapace sont la formule d'Hudson, les formules de Van der Meer et celle de Van Gent (2003) [4] en très faibles profondeurs. C'est cette dernière formule que nous retiendrons.

Impact du changement climatique si l'ouvrage n'est pas modifié

Nous proposons d'étudier l'influence de la remontée du niveau moyen de la mer Δh et de la variation de la hauteur de houle au large ΔH_0 sur les franchissements et la stabilité des blocs.

Franchissements
Avec le changement climatique, les paramètres de dimensionnement qui vont changer sont d'une part H_{m0} la hauteur significative de houle calculée à partir du spectre au pied de l'ouvrage et d'autre part la revanche R_c (le niveau de la crête de l'ouvrage par rapport au niveau moyen de la mer). La variation de la revanche est directement liée à la remontée du niveau moyen de la mer $\Delta R_c = - \Delta h$. Utilisant le logarithme de la formule de TAW (2002) en faible profondeur, nous obtenons le débit spécifique avant et après changement climatique. En

soustrayant les deux équations et en faisant l'hypothèse de petites variations, l'équation suivante est trouvée:

(1)

$$\frac{\Delta q}{q} = \left[\frac{R_C}{H_{m0}} \frac{1}{0.33 + 0.022\xi_{m-1,0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} + \frac{3}{2} \right] \frac{\Delta H_{m0}}{H_{m0}} + \left[\frac{R_C}{H_{m0}} \frac{1}{0.33 + 0.022\xi_{m-1,0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right] \frac{\Delta h}{R_C}$$

Deux termes ont un impact sur l'augmentation du franchissement: d'abord l'augmentation de la hauteur significative de houle à l'ouvrage et ensuite la remontée du niveau moyen de la mer.

Dommages

En utilisant la formule de Van Gent en très faibles profondeurs, la variation du niveau de dommages s'exprime selon la formule suivante :

(2)

$$\frac{\Delta S_d}{S_d} = 5 \frac{\Delta H_s}{H_s}$$

Le taux d'augmentation du dommage est cinq fois plus important que le taux d'augmentation de la hauteur significative.

Renforcement de l'ouvrage pour conserver le même niveau de performance

Nous étudions, dans cette section, les effets du changement climatique (remontée du niveau moyen de la mer et variation de la hauteur de houle au large) sur la construction d'un nouvel ouvrage ou sur l'adaptation de l'ancien ouvrage.

Franchissements

L'objectif est de déterminer d'abord la remontée de la crête de l'ouvrage ΔD ou l'augmentation de la revanche ΔR_c nécessaire à la conservation du débit spécifique de franchissement décidé initialement par le maître d'ouvrage (par exemple, un débit spécifique de 3.10^{-5} $m^3/s/m$ correspondant à un niveau d'insécurité pour des piétons situés sur la crête de la digue). Pour des petits nombres d'Iribarren et un faible débit spécifique q, une équation simple détermine l'augmentation de la revanche en fonction de la hauteur spécifique de houle calculée à partir du spectre :

(3)

$$\Delta R_C = -\gamma_f \gamma_\beta 0.33 \ln q \Delta H_{m0}$$

La remontée de la crête de l'ouvrage ΔD est la somme de l'augmentation de la revanche ΔR_c et de la remontée du niveau moyen de la mer Δh.

(4)

$$\Delta D = \Delta h + \Delta R_C$$

Dommages

Il s'agit ensuite d'estimer l'augmentation du diamètre ΔD_{n50} des blocs nécessaire pour conserver le même niveau d'endommagement de la carapace. En considérant le diamètre des matériaux du noyau petit par rapport au diamètre des blocs on obtient:

(5)

$$\frac{\Delta D_{n50}}{D_{n50}} = \frac{\Delta H_s}{H_s}$$

Propagation de la houle au large jusqu'au pied de l'ouvrage

La remontée du niveau moyen de la mer Δh et la variation de la houle au large ΔH_0 déterminent la variation de la houle significative au pied de l'ouvrage ($\Delta H_{1/3}$ ou ΔH_s avec une approche statistique ou ΔH_{m0} avec une approche spectrale). Goda (2000) [5] propose une formule pour estimer $H_{1/3}$ en faible profondeur (h/L_0 <0,2). L_0 est la longue d'onde.

(6)

$$H_{1/3} = min \{ \beta_0 H_0 + \beta_1 h, \beta_{max} H_0, K_s H_0 \}$$

K_s est le coefficient de shoaling. Les facteurs β_0 , β_1 and β_{max} sont définis comme suit:

(7)

$$\beta_0 = 0,028\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0,38} \exp\left(20m^{1,5}\right) \qquad \beta_1 = 0,52\exp\left(4,2m\right) \qquad \beta_{max} = max\left[0,92, 0,32\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0,29} \exp\left(2,4m\right)\right]$$

En très faibles profondeurs nous faisons l'hypothèse que la formule de Goda se réduit à :

(8) $$H_{1/3} = \beta_0 H_0 + \beta_1 h$$

On en déduit la formule équivalente pour les variations de la hauteur de houle significative à la côte.

(9) $$\Delta H_{1/3} = 0,62\beta_0 \Delta H_0 + \beta_1 \Delta h$$

En faibles profondeurs le rapport $H_{1/3}$ / H_{m0} est plus grand que 1. Nous ferons cependant l'hypothèse que la formule (9) reste valable pour la hauteur significative de houle calculée à partir du spectre.

Application 1 : q=3 10^{-5} m^3/s/m; γ_f=0,4 structure perméable avec des enrochements en deux couches, γ_β=1 attaque frontale des vague, pente des fonds m=1%, hauteur de houle significative au large H_0= 10 m et longueur d'onde au large L_0=150 m. Les équations (3), (4) et (9) donnent:

(10) $$\Delta D = 0,07\Delta H_0 + 1,74\Delta h$$

Application 2: les mêmes données pour une structure imperméable en béton donnent:

(11) $$\Delta D = 0,17\Delta H_0 + 2,86\Delta h$$

Considérant que les variations attendues du niveau moyen de la mer d'une part et de la hauteur significative de houle au large en conditions extrêmes d'autre part sont du même ordre de grandeur (hypothèse pessimiste d'environ 1 m pour chacun à la fin du siècle), les équations (10) et (11) montrent que le facteur dominant sur la remontée de la crête d'ouvrage est le niveau moyen de la mer. Ainsi cette remontée de la crête d'ouvrage est estimée à 1,7 fois la remontée du niveau moyen de la mer pour un ouvrage perméable et presque trois fois pour un ouvrage imperméable en béton.

Application 3:

En utilisant les équations (5) et (9) et en négligeant la part due aux variations de la houle au large dans l'équation (9), on obtient:

(12) $$\frac{\Delta D_{n50}}{D_{n50}} = \frac{\Delta h}{h}$$

Les blocs des ouvrages situés en très faible profondeur peuvent voir leur masse plus que doubler pour une remontée du niveau moyen de la mer de 1 m.

Conclusion

Les ouvrages situés en faibles profondeurs seront très sensibles au changement climatique et principalement à la remontée du niveau moyen de la mer. Trois axes se dégagent pour adapter les structures : limiter le franchissement (par exemple en modifiant le mur de couronnement), améliorer la stabilité de la carapace (en ajoutant une couche d'enrochements supplémentaire ou en adoucissant la pente) et réduire les sollicitations extérieures i.e. la houle (en implantant un ouvrage détaché ou en assurant un rechargement de sable).

Références

[1] Lebreton et Trmal, 2009, *La houille blanche*, Evaluation de l'impact du changement climatique sur le dimensionnement des digues à talus, N°2, pp 45-51
[2] Guide Enrochement, 2009, Utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Traduction française du Rock Manual, PM09.01, CETMEF, 1302 pages
[3] TAW, 2002, *Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken* (Technical report on wave run-up and wave overtopping at dikes - in Dutch). Technical Advisory Committee on Water Defences, Delft, 50 pages
[4] Van Gent M.R.A., Smale A.J. et Kuiper C., 2003, *Stability of rock slopes with shallow foreshores*, Ja Melby (ed) Proc 4th int coastal structures conf. Portland, 26-30 August 2003, ASCE Reston, pp 100 -112
[5] Goda Y., 2000, *Random seas and design of maritime structure,* PL-F Liu (ed), Advanced Series on Ocean Engineering, vol 15, World Scientific,Singapore, 444 pages

POSTERS

Modélisation de type Green-Naghdi de la transformation des vagues en zone littorale : Application aux risques de submersion dus aux vagues extrêmes

Marion Tissier[1], Philippe Bonneton[1], Fabien Marche[2], Florent Chazel[3], David Lannes[4], Rodrigo Pedreros[5]

[1] Université de Bordeaux 1, CNRS, UMR 5805-EPOC, avenue des Facultés, Talence, F-33405 France, m.tissier@epoc.u-bordeaux1.fr, p.bonneton@epoc.u-bordeaux1.fr
[2] Université de Montpellier 2, UMR CNRS 5149, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France, fmarche@math.univ-montp2.fr
[3] Université de Toulouse, UPS/INSA, IMT, CNRS UMR 5219, F-31077 Toulouse, France, florent.chazel@insa-toulouse.fr
[4] DMA/CNRS UMR 8553, Ecole Normale Supérieure, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris, France, david.lannes@ens.fr
[5] BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2, France, r.pedreros@brgm.fr

Abstract : Les changements globaux à venir, d'origines anthropique et climatique, vont entraîner une nette augmentation des risques côtiers, et rendent donc primordial le développement d'outils efficaces pour l'étude des problématiques de submersion. Une bonne prédiction du comportement des vagues en zone de jet de rive ne peut se faire sans une connaissance précise de leurs transformations préalables. L'étude des risques de submersion requiert donc une modélisation de type vague-à-vague, capable de décrire de façon précise la dynamique en zone de levée puis en zone de surf, et cela sur des bathymétries complexes. Le modèle SURF_WB (Marche et al. 2007) a été développé spécifiquement pour décrire la dynamique des vagues déferlées et les mouvements complexes de la ligne d'eau. Cependant, il ne prend pas en compte les effets dispersifs, et n'est donc valide qu'après déferlement. Notre démarche a consisté à étendre le domaine de validité de SURF_WB vers le large en y intégrant des termes dispersifs. L'enjeu majeur a été de développer une stratégie numérique qui permette de conserver les qualités initiales de SURF_WB, en particulier concernant la gestion «naturelle» des vagues déferlées et la simplicité du traitement de la ligne d'eau (Bonneton et al. 2010, Tissier et al. 2010).

Introduction

Les prévisions du GIEC concernant la modification du régime de tempête et l'élévation du niveau de la mer rendent primordial le développement d'outils efficaces pour l'étude des risques de submersion. Une bonne prédiction du comportement des vagues en zone de jet de rive ne peut se faire sans une connaissance précise de leurs transformations préalables. L'étude des risques de submersion requiert donc une modélisation de type vague-à-vague, capable de décrire de façon précise la dynamique en zone de levée puis en zone de surf, et cela sur des bathymétries complexes. Ces modèles vague-à-vague peuvent être basés soit sur les équations de type Boussinesq, soit sur les équations de Saint-Venant.

Les modèles basés sur des équations de type Boussinesq sont des outils très puissants pour décrire l'hydrodynamique côtière. Comme ils tiennent en compte à la fois les effets non-linéaires et dispersifs, ils peuvent prédire de façon précise les transformations des vagues non-déferlées d'eau profonde à peu profonde. Cependant, ces équations n'incluent pas naturellement la dissipation due au déferlement, et deviennent donc invalides en zone de surf. La stratégie la plus commune pour étendre le domaine de validité de ces modèles consiste à

intégrer une paramétrisation empirique de la dissipation (Madsen et al. 1997, Kennedy et al. 2000, Cienfuegos et al. 2009). FUNWAVE est un exemple connu de ce type de modèle. Il peut donner de très bons résultats, mais chaque utilisation nécessite un « tuning » préalable de plusieurs paramètres déterminants, puisque influant sur le déferlement et le run-up.
Les modèles basés sur les équations de Saint-Venant (SV) peuvent eux gérer la dissipation due au déferlement et les mouvements de la ligne d'eau de façon simple. Les vagues déferlées sont assimilées à des chocs. Elles se propagent et dissipent leur énergie sans nécessiter de paramétrisation *ad-hoc*. Ce dernier aspect est très important, puisque la dissipation d'énergie due au déferlement va déterminer la surcote liée aux vagues, phénomène clé dans les problématiques de submersion. Le modèle SV SURF_WB (Marche et al. 2007) a été développé spécifiquement pour décrire la dynamique en zones de surf et de jet de rive sur des bathymétries complexes. Il a été appliqué avec succès à des cas de submersion dans le cadre de l'ANR MISEEVA (inondations de Palavas-Les-Flots, Pedreros et al. 2010). Cependant, comme ce type de modèle ne prend pas en compte les effets dispersifs, il est invalide en zone de levée et ne peut être appliqué qu'aux vagues déferlées.
Notre travail a consisté à étendre le domaine de validité de SURF_WB en y intégrant les effets dispersifs. Le « nouveau » modèle est basé sur les équations de Green-Naghdi (GN), qui sont les équations de Boussinesq fortement non-linéaires de base. Elles peuvent être décomposées en une partie correspondant aux équations de Saint-Venant, et un terme dispersif. L'idée est de traiter les vagues non-déferlées par les équations de GN, et les vagues déferlées par les équations de SV, le passage d'un système d'équation à l'autre se faisant en supprimant localement le terme dispersif. Les vagues déferlées peuvent ainsi se propager dans la zone de surf de façon naturelle, gouvernées localement par les équations de SV.

Brève description du modèle
Les équations de GN sont tout d'abord reformulées de la façon suivante :

$$\left\{\begin{aligned}&\partial_t h + \varepsilon\nabla\cdot(hv) = 0\\&\partial_t(hv) + gh\nabla\delta + \varepsilon\nabla\cdot(hv\otimes v) = -D,\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

où D est le terme caractérisant les effets dispersifs :

$$D = -\frac{1}{\alpha}h\nabla\delta + \left(I + \mu\alpha hT[h,b]\frac{1}{h}\right)^{-1}\left[\frac{1}{\alpha}h\nabla\delta + \varepsilon\mu hQ_1[h,b](v)\right],$$

où T et Q_1 sont deux opérateurs non définis ici (voir Bonneton et al. 2010 pour les détails). Remarquons que si D=0 on obtient les équations de Saint-Venant. Cette reformulation permet de coupler de manière simple les équations SV et GN.
La partie SV et le terme dispersif vont être traités séparément à chaque pas de temps en utilisant une méthode de splitting. La partie Saint-Venant est résolue en utilisant les méthodes numériques développées pour SURF_WB (Volumes Finis), tandis que les termes dispersifs sont traités par une méthode de type Différences Finies dans un second temps. Les schémas numériques sont d'ordre 4 en espace et en temps.

Gestion du déferlement
L'idée est de passer des équations GN à SV localement dans le temps et dans l'espace en supprimant le terme dispersif D (cf. équation (1)) quand la vague est prête à déferler. Comme nous voulons appliquer notre code à des conditions réelles, i.e. à des vagues irrégulières avec différents points de déferlement, chaque vague doit être traitée séparément. Nous avons besoin d'une méthode permettant de localiser les fronts à chaque instant, ainsi que d'un critère permettant de décider quand initier le déferlement pour un front donné.
Afin de localiser et caractériser les fronts de vagues à chaque pas de temps, nous estimons la dissipation d'énergie correspondant à la première étape SV. Cette dissipation est proche de

zéro dans les parties régulières de la vague, et forme un pic quand des chocs se développent (voir Figure 1). On peut alors facilement repérer les fronts de vague à chaque pas de temps, et sauter l'étape dispersive pour un front donné quand la vague est prête à déferler. De plus, après intégration sur le front et normalisation, la dissipation permet de déterminer de manière simple si un front donné est déferlé ou non. En effet, la dissipation normalisée est proche de 1 quand le front est totalement déferlé, et proche de zéro sinon. L'étude de la dissipation est ensuite combinée avec un critère basé sur la pente du front de la vague pour déterminer quand initier et terminer le déferlement (critère initialement introduit par Schäffer et al. 1993).

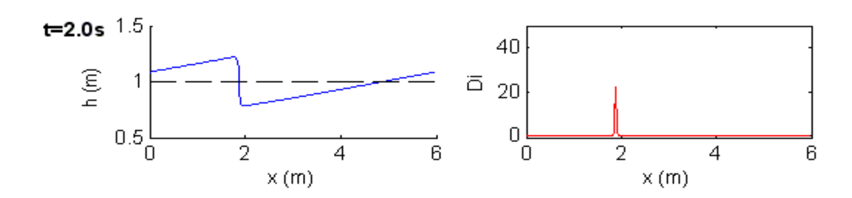


Figure 1. Déferlement d'un vague sur fond plat. A gauche la surface libre, à droite la dissipation d'énergie Di à t=2.0s.

Applications

Notre méthode est illustrée Figure 2. Dans cet exemple, on considère la propagation et le déferlement de vagues périodiques sur une plage de pente fixe (expériences de Cox, 1995). Les zones déterminées par des traits verticaux correspondent aux zones où le passage d'un système d'équations à l'autre est réalisé à un instant donné, permettant le déferlement puis la propagation des vagues déferlées. On peut également voir sur cette figure que la forme typique des vagues en zone de surf, dite en dent de scie est correctement reproduite. L'ancienne version de SURF_WB ne permettait que de simuler l'hydrodynamique en zones de surf et de jet de rive (c'est-à-dire pour X>13m sur cette figure). Notre nouveau modèle permet de commencer la simulation plus au large. Il peut prédire la propagation de la vague sur le plateau continental, l'augmentation de son amplitude en zone de levée, et enfin son déferlement.

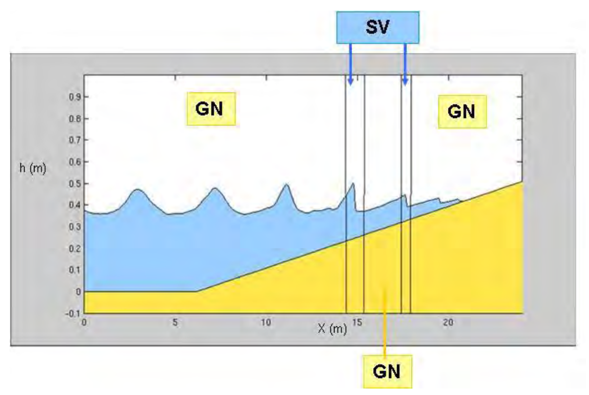


Figure 2. Vagues périodiques se propageant et déferlant sur un plage de pente constante. Les traits verticaux déterminent des zones où la propagation de la vague est gouvernée par les equations de SV à un instant donné.

Ce modèle a été intensivement validé en 1D en utilisant solutions analytiques et expériences en laboratoire (Bonneton et al. 2010, Chazel et al. 2010, Tissier et al. 2010), et a donné des résultats très satisfaisants. En particulier, il a été testé en utilisant les données de laboratoire de Synolakis (1987), concernant le déferlement et run-up d'une onde solitaire sur une plage de pente constante. La Figure 3 compare données expérimentales et prédictions du modèle à différents instants. Elle montre un très bon accord, que ce soit en zone de levée (t*=10 et 15),

ou en zone de surf (t*>15), où l'asymétrie de la vague et sa décroissance en amplitude est bien décrite. En particulier, ce cas test montre que le modèle donne une bonne prédiction des mouvements de la ligne d'eau, point crucial pour l'application aux phénomènes de submersion.

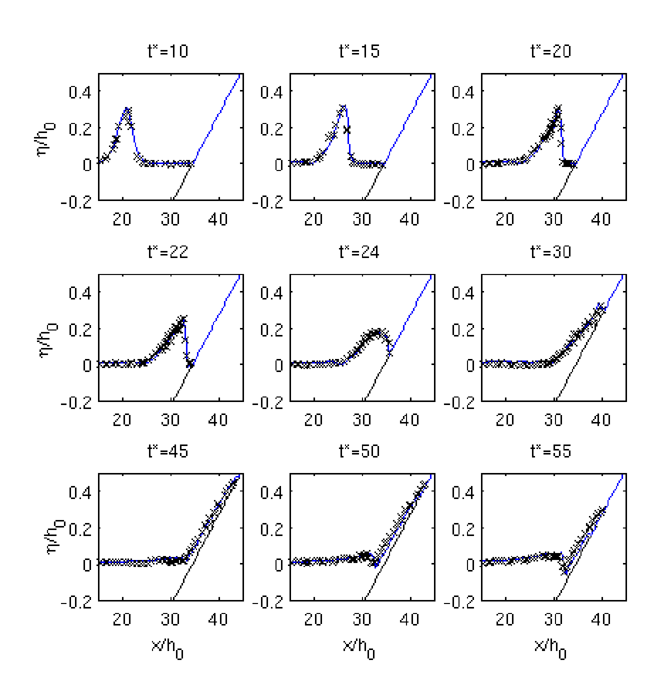


Figure 3. Comparaison des données expérimentales (+) et prédictions du modèle (traits pleins) pour une onde solitaire déferlant sur une plage de pente constante (Synolakis 1987). Surface libre à différents instants. $t^*=t(g/h_0)^{1/2}$.

Conclusions

La prise en compte des effets dispersifs dans le code SURF_WB a permis d'augmenter considérablement son domaine de validité. Le modèle « étendu » est maintenant capable de décrire de manière efficace la dynamique en zone de levée, tout en gardant les qualités initiales de SURF_WB concernant ces capacités à décrire la dynamique des vagues déferlées et les mouvements complexes de la ligne d'eau. De plus, des tests préliminaires ont montré que le modèle pouvait gérer les problématiques de dépassement de structures (overtopping) sans difficulté particulière, ce qui en fait un outil potentiellement très efficace pour l'étude des submersions. Le développement d'une version 2DH, nécessaire pour l'application à des cas réels, est en cours.

Publications dans le cadre de l'ANR MISEEVA

Bonneton, P., Chazel, F., Lannes, D., Marche, F. and Tissier, M. (2010) A splitting approach for the fully nonlinear and weakly dispersive Green-Naghdi model. *In correction to J. Comput. Phys.*

Bonneton, P., Chazel, F., Cienfuegos, R., Lannes, D., Marche, F. and Tissier, M. (2010) Recent advances in Serre-Green Naghdi modelling for wave transformation, breaking and runup processes. *In correction to European Journal of Mechanics, B/Fluids.*

Tissier, M., Bonneton, P., Marche, F., Chazel, F.and Lannes, D. (2010) Serre Green-Naghdi modelling of wave transformation breaking and run-up using a high-order finite-volume finite-difference scheme. *Proc. 32nd Int. Conf. on Coastal Eng., Shanghai, China.* (ICCE2010 Award : Best Abstract by a Student)

Influence de l'angle des vagues sur la réponse morphologique d'une plage à deux barres

Jérôme Thiébot[1], Déborah Idier[1], Roland Garnier[2], Albert Falqués[2] et Gerben Ruessink[3]

[1]BRGM, RNSC/RIC, 3 av. C. Guillemin, 45060 Orléans Cedex, j.thiebot@brgm.fr
[2]Departament de Fisica Aplicada, Univeristat Politècnica de Catalunya (UPC), C/ Jordi Girona 1-3, Mòdul B4/B5, despatx 103, E-08034-Barcelona, Catalonia, Spain.
[3] Department of Physical Geography, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht University, P.O. Box 80.115, 3508 TC Utrecht, the Netherlands

Résumé :

La dynamique des barres sableuses d'avant-côte est régie par des phénomènes qui agissent sur des échelles de temps et d'espace très variables. Dans cette étude, nous étudions un système de plage à double barres en se focalisant sur l'influence de l'angle d'incidence des vagues. Nous utilisons un modèle morphodynamique 2DH. Par auto-organisation, plusieurs types de figures sédimentaires rythmiques apparaissent le long des barres. Les vagues frontales ont tendance à favoriser l'apparition de barres en croissant. Ce type de morphologie disparaît pour des incidences moyennes. Les vagues arrivant obliquement par rapport à la côte favorisent l'apparition de barres transverses obliques. Le mécanisme à l'origine de l'apparition de ces barres transverses est nouveau par rapport à ceux décrits dans la littérature.

Introduction

Les barres sableuses d'avant côte possèdent des morphologies complexes qui évoluent rapidement sous l'action des vagues. Ces barres sont souvent caractérisées par la présence de figures sédimentaires rythmiques telles que des barres en croissant, des barres/baïnes ou des barres transverses. L'apparition de ces figures s'explique en partie par le mécanisme d'auto-organisation, c'est-à-dire les interactions entre les évolutions du fond, les courants et les vagues (Figure 1). Dans cette étude, nous nous focalisons sur le comportement d'un système à deux barres soumis à un forçage stationnaire induit par les vagues. L'influence de l'incidence des vagues (notée θ) est étudiée en imposant plusieurs directions de vagues au bord du domaine de calcul. La hauteur et la période des vagues sont les mêmes pour toutes les simulations. Les objectifs de cette étude sont (i) d'identifier les morphologies qui peuvent apparaître le long des plages à deux barres lorsque les vagues sont obliques par rapport à la côte et (ii) de comprendre les mécanismes associés.

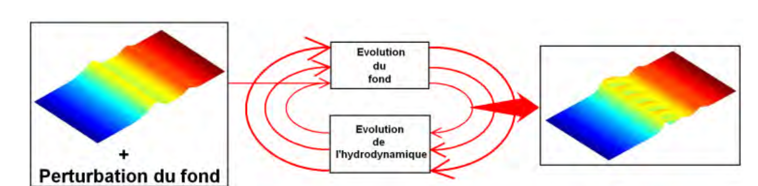


Figure 1 : Schéma de principe de l'auto-organisation (source : Thiébot *et al.*, 2010).

Description des configurations simulées et du modèle

La bathymétrie utilisée au début de chaque simulation est uniforme en longshore (les barres sont rectilignes et parallèles à la côte). La bathymétrie est idéalisée mais réaliste. Le

profil utilisé pour construire la bathymétrie initiale est tel que la barre interne (resp. externe) est située à 50 m (resp. 230 m) de la plage immergée à une profondeur de 1,5 m (resp. 3,5 m). Le domaine de calcul mesure 4000 m en longshore et 750 m en cross-shore. La taille des mailles est de 10 m dans les deux directions. Des petites perturbations sont imposées sur le fond à $t = 0$ pour initier le mécanisme d'auto-organisation (Figure 1). Les vagues imposées au bord du domaine ont les caractéristiques suivantes : H_s= 2,1 m, T_p = 6,5 s et $\theta = 0, \ldots, 40°$. La valeur de 40° correspond à l'incidence maximale au niveau de la barre externe. Cette valeur a été calculée en utilisant la relation de dispersion.

Le modèle utilisé dans cette étude est le code MORFO55 (Garnier *et al.*, 2006, 2010). C'est un modèle non linéaire 2DH. Le système d'équations (moyennées sur la verticale) contient une équation de conservation de la masse (1), une équation de conservation de la quantité de mouvement (2) et une équation de conservation du sédiment (3). La propagation des vagues est simulée en utilisant une équation de dissipation de l'énergie des vagues et la loi de Snell. Le flux de sédiment horizontal est calculé avec la formule de Soulsby and Van Rijn (4). La variable α est calculée avec l'équation (5) (Soulsby, 1997).

(1) $$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D v_i\right) = 0$$

(2) $$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -g\frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho D}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(S'_{ij} - S''_{ij}\right) - \frac{\tau_{bi}}{\rho D}$$

(3) $$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-p}\frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0$$

(4) $$\vec{q} = \alpha\left(\vec{v} - \gamma u_b \vec{\nabla} h\right)$$

(5) $$\alpha = A\left[\left(|\vec{v}|^2 + \frac{0.018}{c_D}{u_b}^2\right)^{1/2} - u_{crit}\right]^{2.4} \quad \text{if} \left(|\vec{v}|^2 + \frac{0.018}{c_D}{u_b}^2\right)^{1/2} > u_{crit}$$
$$\alpha = 0 \quad \text{sinon}$$

où D est la profondeur (D=z_s-z_b), t est le temps, v désigne la vitesse du courant moyennée sur la verticale, g est la gravité (g=9,81 m s^{-2}), ρ est la masse volumique de l'eau (ρ=1024 kg m^{-3}), S'_{ij} et S''_{ij} sont les tensions de radiation et les tensions de Reynolds, $\vec{\tau}_b$ est le frottement sur le fond, p est la porosité du sédiment (p = 0,4), h est la perturbation du fond, q_j sont les composantes du flux de sédiment horizontal, γ est un coefficient permettant de prendre en compte l'effet de pente, u_b est la vitesse orbitale rms au fond. A est un coefficient qui dépend des caractéristiques du sédiment (d_{50} = 200 µm) et de la profondeur. c_D est la coefficient de frottement morphodynamique, u_{crit} est la vitesse critique d'érosion.

A partir des équations (3) et (4), Falqués *et al.* (2000) ont introduit l'équation (6). Cette équation permet d'analyser les liens entre les forçages hydrodynamiques et la réponse morphologique du système. Le premier terme du membre de droite est un terme de production, le second est un terme de diffusion. Les mécanismes connus de génération d'instabilités sont liés à la composante cross-shore du terme de production. Il s'agit des couplages bedsurf (Falqués *et al.*, 2000) et bedflow (Falqués *et al.*, 1996).

(6) $$\frac{\partial h}{\partial t} = -D\vec{v}\cdot\vec{\nabla}C + \vec{\nabla}\cdot(\Gamma\vec{\nabla}h)$$ où $\Gamma=\alpha\, \gamma\, u_b$ et $C=\alpha/D$.

Résultats

Pour décrire la réponse du système, nous nous basons sur les évolutions du fond le long de chacune des barres. A l'aide d'une transformée de Fourier, nous calculons la longueur d'onde λ_p des figures rythmiques. Le temps de réponse de la plage est quantifié avec le taux de croissance σ des figures rythmiques (voir Garnier *et al.*, 2006 pour plus de détails). Pour avoir une vision globale de l'influence de l'angle sur la réponse morphologique du système, nous avons étudié la relation entre l'angle d'incidence des vagues et la longueur d'onde des

instabilités (Figure 2) d'une part et le taux de croissance des instabilités (Figure 3) d'autre part. Ces deux figures permettent de distinguer quatre types de réponses distinctes notées Ti.

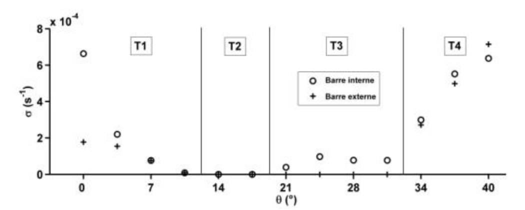


Figure 2 : Evolution du taux de croissance des figures rythmiques en fonction de l'incidence au niveau de la barre externe.

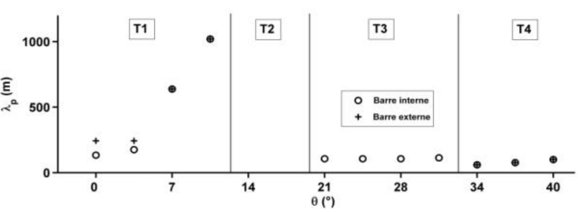


Figure 2 : Evolution de la longueur d'onde des figures rythmiques en fonction de l'incidence au niveau de la barre externe.

Les incidences faibles (θ≤11°) favorisent l'apparition de barres en croissant (Figure 4) dont la longueur d'onde croît avec l'incidence des vagues. L'apparition de ces instabilités est due au couplage « bedsurf » (Falqués *et al.*, 2000, Garnier *et al.*, 2010). Ce type de réponse est noté T1. Pour T1, le taux de croissance diminue avec *θ*. Cette diminution est telle que les barres en croissant n'apparaissent plus lorsque *θ*=14,17° (T2). Le mécanisme qui empêche la formation de barres en croissant lorsque les vagues arrivent obliquement par rapport à la côte est décrit en détails dans Garnier *et al.* (2009). Les incidences plus fortes (θ≥21°) favorisent la formation de deux types de barres transverses obliques (T3 et T4). Ces deux types de barres se distinguent notamment par leur orientation (Figure 5 et Figure 6). Les instabilités T3 (resp. T4) sont orientées dans le sens du (resp. face au) courant longshore.

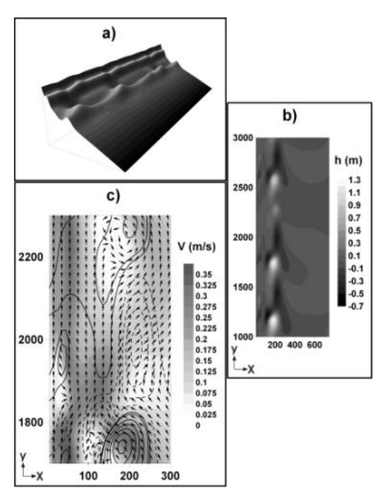


Figure 4 : Réponse du système lorsque l'incidence des vagues est de 7°: a) visualisation 3D de la plage sous-marine; b) Evolution verticale du fond; c) champ de courant 2DH.

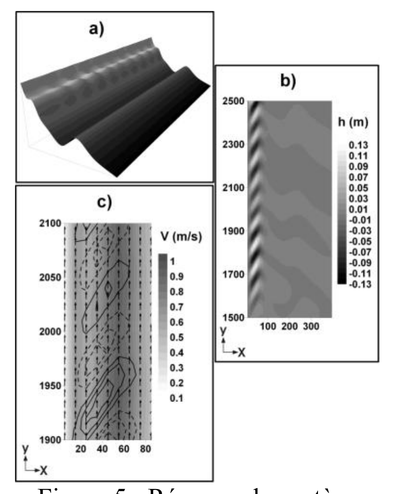


Figure 5 : Réponse du système lorsque l'incidence des vagues est de 28° au niveau de la barre externe: a) Visualisation 3D de la plage sous-marine; b) Evolution verticale du fond; c) champ de courant 2DH.

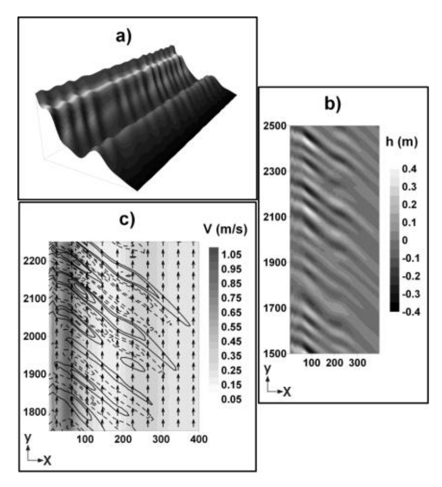


Figure 6 : Réponse du système lorsque l'incidence des vagues est de 37° au niveau de la barre externe: a) Visualisation 3D de la plage sous-marine; b) Evolution verticale du fond; c) champ de courant 2DH.

L'analyse des termes de l'équation (6) montre que l'apparition des barres transverses obliques est liée au couplage entre les évolutions du fond et le gradient longshore de concentration en sédiment. C'est un nouveau type d'instabilité car les mécanismes de génération d'instabilité connus sont liés à la composantes cross-shore du terme de production.

Discussion et conclusion

Cette étude montre que la réponse morphologique d'un système de plage à deux barres dépend fortement de l'incidence des vagues. Une incidence faible favorise l'apparition de barres en croissant. Un exemple de ce type de morphologie est représenté sur la Figure 7 b). Pour les incidences fortes, le modèle indique que deux types de barres obliques transverses peuvent apparaître sous l'effet du couplage entre les évolutions du fond et les gradients longshore de concentration en sédiment. Les morphologies illustrées sur les Figures 7c et 7d montrent des analogies avec ce type de barres.

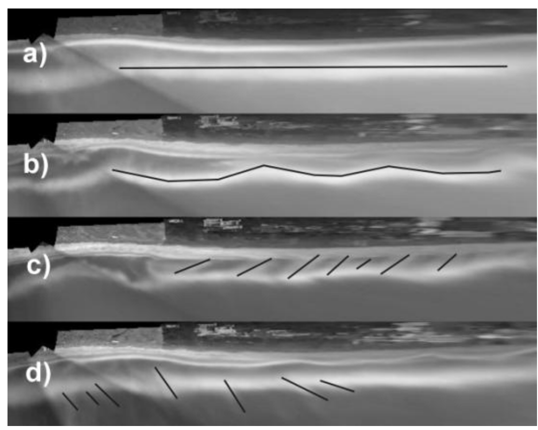


Figure 7 : Morphologies observées le long de la plage de Duck (USA). Source : van Enckevort *et al.* (2004).

Remerciements

Les auteurs remercient le projet ANR VMC 2006 - VULSACO n°ANR-06-VULN-009.

Références

Falqués A., Montoto A., Iranzo V. (1996) Bed-Flow instability of the longshore current. Continental Shelf Res., 16 (15), 1927-1964.

Falqués A., Coco G., Huntley D.A. (2000) A mechanism for the generation of wave driven rhythmic patterns in the surf zone. J.Geophys.Res., 105(C10), 24071-24087.

Garnier R., Calvete D., Falqués A., Caballeria M. (2006) Generation and non linear evolution of shore-oblique/transverse bars. Journal of Fluid Mechanics, 567, 327-360.

Garnier R., Dodd N., Falqués A., Calvete D. (2009) A mechanism inhibiting rip channel formation for oblique waves. Proceedings of Castal Dynamics 2009, Impacts of Human Activities on Dynamic Coastal Processes. DOI n° 10.1142/9789814282475_0039, 1-13.

Garnier R., Dodd N., Falqués A., Calvete D. (2010) Mechanisms controlling crescentic bar amplitude. J. Geophys. Res., 115, F02007, doi:10.1029/2009JF001407.

Soulsby R.L. (1997). Dynamics of marine sand: A manual for practical applications. Thomas Telford Publications, London, 249 p.

Thiébot J., Idier D., Falqués A., Calvete D., Certain R. et Garnier R. (2010) Modélisation de la morphodynamique des barres d'avant-plage par analyse de stabilité linéaire : application à la plage du Lido de Sète. 97-103. La Houille Blanche. DOI: 10.1051/lhb/2010011

Van Enckevort I.M.J., Ruessink B.G., Coco G., Suzuki K., Turner IL., Plant NG. and Holman RA. (2004), Observations of nearshore crescentic sandbars, J. Geophys. Res., 109, C06028, doi:10.1029/2003JC002214.

IMPACTS POTENTIELS DE CONDITIONS METEO-MARINES EXTREMES SUR UNE COTE BASSE DENSEMENT PEUPLEE : LE CAS DU LITTORAL DUNKERQUOIS, NORD DE LA FRANCE

Maspataud, Aurélie [1,2,3], Ruz, Marie-Hélène [1,2,3], Vanhée, Stéphane [4]

[1] Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France.
[2] ULCO, LOG, F-62930 Wimereux, France.
[3] CNRS, UMR8187, R-62930 Wimereux, France.
Aurelie.Maspataud@univ-littoral.fr, ruz@univ-littoral.fr
[4] Institution Interdépartementale des Wateringues, 62505 Saint-Omer, France

Résumé :
Le littoral dunkerquois, comme la plupart des côtes méridionales de la Mer du Nord, est constitué de zones basses et densément peuplées, bordées de cordons dunaires qui protègent de l'inondation un polder localement situé sous le niveau moyen de la mer. Ce territoire est vulnérable et soumis à un triple risque car des conditions météo-marines extrêmes peuvent induire de fortes surcotes et provoquer (1) un recul du trait de côte, (2) une submersion marine ainsi que (3) des inondations, du fait de problèmes de drainage et d'évacuation des eaux du polder. Des évènements tels que la tempête de novembre 2007 auraient pu causer des dommages bien plus importants s'ils s'étaient produits à pleine mer et/ou lors d'une grande marée. Dans le contexte actuel de changement climatique et de hausse du niveau de la mer, ces impacts potentiels seraient à prendre en compte dans les politiques de défense contre la mer et de protection des populations littorales, de façon à établir des systèmes d'alerte, ce qui n'est actuellement pas le cas dans cette région.

Introduction

En Mer du Nord, les côtes du Danemark, du Nord de l'Allemagne, des Pays-Bas, du Royaume-Uni, de la Belgique et du Nord de la France, sont particulièrement sensibles aux marées et surcotes de tempêtes (Lamb, 1991 ; Langenberg *et al.*, 1999). Dans le passé, des ondes de tempête engendrées par les vents du Nord et de l'Ouest ont engendré de grands cataclysmes le long de ces côtes. Les eaux, repoussées par les vents, provoquent des surélévations du niveau d'eau qui sont catastrophiques lorsqu'elles coïncident avec de forts marnages et surtout des pleines mers de vive-eau. Leurs impacts sont malheureusement bien connus sur ces côtes de la Mer du Nord depuis l'évènement de 1953, qui a engendré localement des submersions de digues et d'importantes inondations, en particulier aux Pays-Bas et en Angleterre où leurs conséquences ont été dramatiques, causant des milliers de victimes (McRobie et al., 2005). Les littoraux bas qui bordent généralement ces côtes basses sont vulnérables aux phénomènes de submersion et d'érosion marine, tout particulièrement dans le contexte actuel de montée du niveau marin et dans l'hypothèse de possibles changements dans le régime des tempêtes associés au changement climatique (Zhang *et al.,* 2004; IPCC, 2007).

Un secteur d'étude bas et vulnérable

Sur les côtes méridionales de la Mer du Nord, une grande partie de la plaine maritime flamande est constituée de zones basses densément peuplées, bordées de cordons dunaires qui protègent de l'inondation un arrière-pays localement situé sous le niveau moyen de la mer. De Dunkerque à la frontière belge, le littoral est désormais très urbanisé et les derniers espaces naturels (7 km de dunes côtières) qui subsistent, représentent un rempart entre la mer et le

polder. Aujourd'hui, les communes côtières présentent une forte densité de population, avec par exemple 1980 hab/km^2 à Dunkerque, ce qui est largement supérieur à la moyenne nationale. A l'arrière-pays, vivent actuellement 450 000 habitants sur une superficie de 100 000 ha. C'est dans ce secteur que se trouve "Les Moëres", la plus basse commune française, située jusqu'à 2 m sous le niveau moyen de la mer, et protégée des inondations marines par les dunes côtières (Figure 1). Afin d'éviter que le polder ne soit inondé, la quasi-totalité de la plaine maritime flamande et plus spécialement le territoire des Wateringues, est couverte par un réseau dense de canaux et de pompes qui drainent les eaux excédentaires du polder et les évacuent directement dans la mer lors des basse-mers.

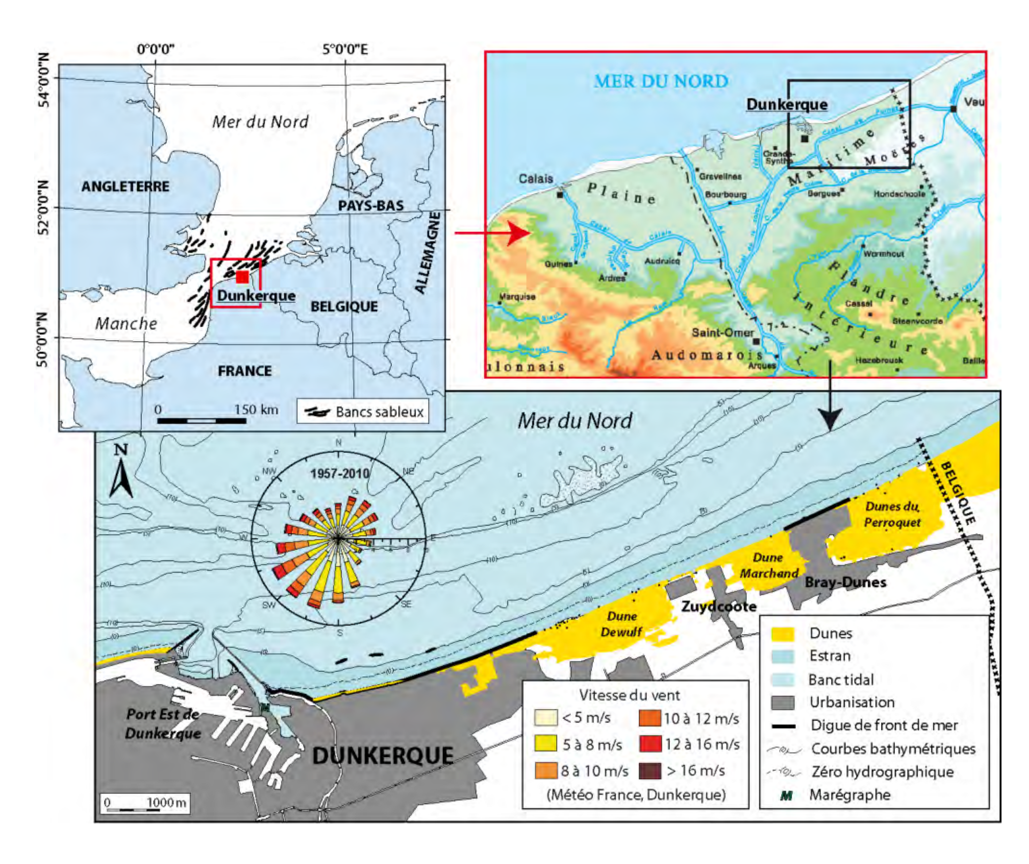


Figure 1 – Localisation de la région d'étude sur les côtes Sud de la Mer du Nord.

Les côtes de l'extrême Nord de la France, sont épisodiquement exposées à des évènements tempétueux qui induisent une érosion côtière. Le long de cette côte macrotidale, le marnage est de l'ordre de 3.5 m en marée de mortes-eaux moyenne et 5.4 m lors de vives-eaux moyennes. Cette côte est exposée à des vents modérés dominants et parallèles à la côte, d'une large fenêtre Sud à Sud-Ouest (Figure 1). Bien que cette côte soit exposée à un fetch limité et à des vagues de relativement faible énergie, d'une hauteur significative à la côte généralement inférieures à 1 m et de 5 à 6 s de période, de forts vents de secteur Nord associés à une basse pression atmosphérique peuvent fréquemment induire de fortes surcotes (1 à 1.5 m) responsables d'une érosion de la plage et de la dune, d'un recul du trait de côte, ainsi que de problèmes de drainage et d'évacuation des eaux excédentaires du polder.

Un territoire à risque, avéré dans le passé et persistant aujourd'hui

Si dans le Nord de l'Europe, les esprits restent marqués par *"The Big Flood"* de 1953, qui avait affecté les côtes hollandaises, anglaises, belges et danoises, en France, la région dunkerquoise avait également subi cette tempête. Durant cet évènement, les impacts locaux dus aux hauts niveaux d'eau et à la forte houle furent tout de même importants (deux brèches

et une submersion de la digue du canal exutoire, une inondation marine, une érosion des plages et dunes) mais heureusement sans victimes humaines contrairement à l'Angleterre et aux Pays-Bas.

Cinquante quatre ans plus tard, une nouvelle forte tempête, qui a débuté dans la nuit du 8 au 9 novembre 2007, a affecté l'ensemble des côtes de la Mer du Nord (Parker et Foden, 2009). Avec de forts vents frontaux (N-NW, et >10 m/s), persistants (48h) et combinés à une chute de la pression atmosphérique de 23 hPa, des surcotes se sont produites à pleine mer (1.20 m) comme à basse mer (2.40 m), provoquant (1) une érosion dunaire, (2) une submersion de la digue de front de mer ainsi (3) qu'un blocage de l'évacuation des eaux intérieures pendant 24h (Figure 2). Les niveaux d'eau maximums enregistrés au marégraphe de Dunkerque (sans les vagues) ont atteint 6.79 m et 6.83 m (CM) le 9 novembre. La surcote record de 2.40 m, sans précédent à Dunkerque depuis la tempête de 1953, s'est heureusement produite à marée basse en conditions de vives-eaux moyennes (coefficient 76, marnage de 4.67 m). De plus, le paroxysme de cette tempête a eu lieu 5 heures avant la pleine mer, donc avec un décalage de quelques heures à peine, les conséquences de cet épisode auraient pu être bien plus sévères. Au regard de certains évènements passés (les 31 janvier/1er février 1953, le 12 janvier 1978, les 19-20 mars 2007 (Maspataud, 2011)), cette tempête aurait pu avoir des conséquences bien plus catastrophiques si elle s'était produite à pleine mer et/ou lors d'une grande marée.

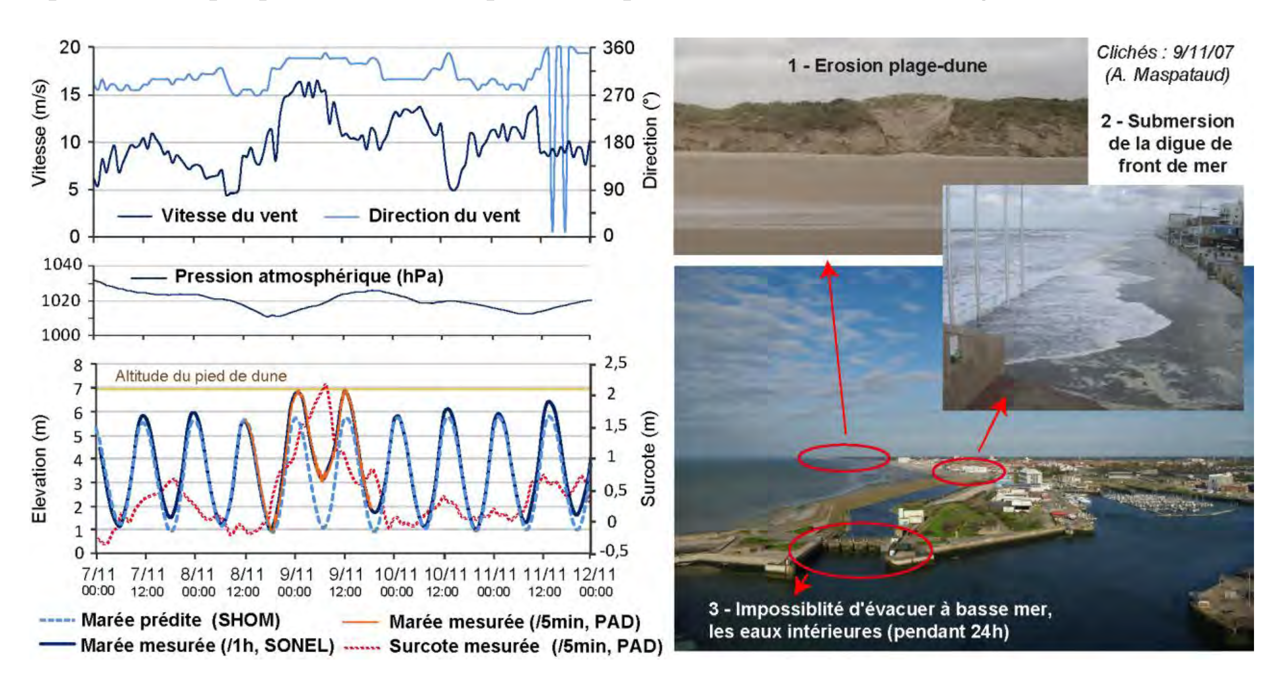


Figure 2 - Conditions météo-marines enregistrées à Dunkerque et impacts recensés lors de la tempête des 8-9 novembre 2007.

Risques potentiels

Dans l'hypothèse où la surcote record de 2.40 m enregistrée lors de la tempête de novembre 2007 se produirait à pleine mer, dans les mêmes conditions de marée (marnage de moyennes vives-eaux (4.66 m) ; Cote Marine prédite = 5.76 m, CM potentiellement atteinte = 8.15 m) et toujours sous l'influence de forts vents frontaux (NW-N), plusieurs secteurs urbains pourraient être inondés, en particulier de nouvelles zones résidentielles bâties à faible altitude (CM = 7.49-7.79 m) en bordure même du port Est de Dunkerque. Si cette même surcote se produisait à pleine mer lors d'une grande marée (marnage de grandes vives-eaux (5.67 m) ;

CM prédite = 6.34 m, CM potentiellement atteinte = 8.74 m), comme cela aurait pu se produire 15 jours plus tôt ou plus tard, les zones potentiellement inondées pourraient être plus étendues et, en cas de saturation des canaux d'évacuation ou de brèche, plusieurs secteurs de la ville de Dunkerque sont suffisamment bas pour se trouver de nouveau inondés, comme cela a eu lieu en 1953.

De tels évènements pourraient induire des dommages importants dans un futur proche, en termes de submersion marine, d'érosion dunaire et d'inondation, tout spécialement si un évènement extrême se produit en conjonction d'une ou plusieurs pleines mers, lors d'une grande marée. Des zones étendues, proches du front de mer, pourraient être submergées et/ou inondées, les dunes côtières, qui constituent un rempart naturel contre les incursions marines, risquent de reculer de façon importante, et le polder pourrait être inondé. Dans ce secteur, les impacts des évènements extrêmes, tels que le recul du trait de côte, la submersion marine et les inondations (ville et polder), dépendent fortement de la conjonction de 3 facteurs : (1) une violente tempête (des vents de Nord persistants et une basse pression atmosphérique, induisant une surcote), (2) une pleine mer, (3) une marée de vives-eaux ou d'équinoxe. De telles conditions peuvent être amplifiées, en particulier dans le cas de brèche ou submersion de digue à haute mer, d'impossibilité d'évacuer à basse mer les eaux excédentaires intérieures, de panne ou de saturation des pompes, et bien sûr en cas de facteur climatique aggravant (fortes pluies persistantes).

Conclusions

Il existe aujourd'hui une réelle vulnérabilité de cette portion de littoral face aux évènements extrêmes, aux submersions marines et aux inondations de territoires urbains comme agricoles. Ceci soulève des inquiétudes quant à la capacité du système actuel de drainage à évacuer les eaux excédentaires, et sur la pérennité de l'évacuation gravitationnelle de l'eau du polder. Dans le contexte actuel de changement global et de hausse du niveau moyen marin, il est important que les parties prenantes prennent en compte ces impacts potentiels afin de renforcer la défense contre la mer, augmenter l'activité et efficacité des systèmes de pompage et, face à des défis croissants en matière d'alerte et de protection des populations littorales, établir des systèmes d'alerte, comme en Belgique ou aux Pays-Bas, ce qui n'est actuellement pas le cas dans cette région.

Références bibliographiques

IPCC 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.

Lamb H., 1991. *Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge University Press.

Langenberg H., Pfizenmayer A., Von Storch H. et Sundermann J., 1999. Storm-related sea level variations along the North Sea coast: natural variability and anthropogenic change. *Continental Shelf Research*, 19, 6, 821-842.

Maspataud A, (en préparation). *Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal.* Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale.

Parker J.A. et Foden D., 2009. High-resolution Measurement of a North Sea Storm Surge. *Journal of Coastal Research*, SI 56, ICS2009, 1656-1660.

Zhang G.K., Douglas B.C. et Leatherman S.P., 2004. Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41-58.

RECONSTITUTION ET ANALYSE DES SIGNAUX MARINS DU GOLFE DU LION

Cyril Vanroye, Frédéric Pons, Céline Trmal

DREAL Languedoc-Roussillon, Montpellier, cyril.vanroye@developpement-durable.gouv.fr
CETE Méditerranée, Aix-en-Provence, frederic.pons@developpement-durable.gouv.fr
CETE Méditerranée, Aix-en-Provence, celine.trmal@developpement-durable.gouv.fr

Introduction

Le littoral du Languedoc-Roussillon, de par ses caractéristiques physiques, est exposé aux aléas littoraux actuels. A fortiori, il se présente comme particulièrement vulnérable dans le futur : élévation du niveau marin, changement du régime de tempête.

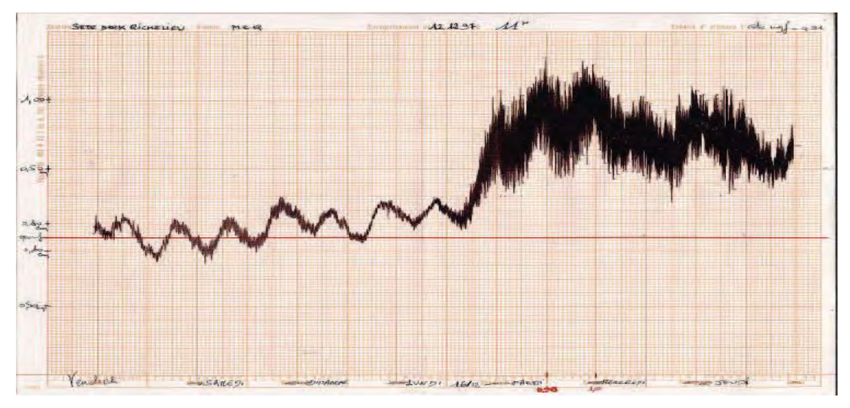
Des mesures de niveaux ont été réalisées à différentes périodes à la fois en mer et dans les étangs arrières littoraux mais n'ont jamais été capitalisées du fait de leur faible intérêt pour la navigation. Par contre, elles sont indispensables à la caractérisation des évènements extrêmes actuels et dans la mesure du possible à la régionalisation de l'élévation de niveau marin.

Traiter les données marines pour caractériser la submersion

La submersion marine est un phénomène physique extrêmement complexe qui se caractérise par une élévation du plan d'eau que constitue la mer sous l'action de différents éléments (vent, pression atmosphérique, marée astronomique, effet des vagues) et l'envahissement des zones basses à l'arrière du front de mer.

Des instruments de mesure marégraphiques ont été implantés à différentes périodes sur le littoral du Golfe du Lion et ont permis d'acquérir des mesures de niveaux marins. Ces données constituent la connaissance historique de l'aléa. Elles se présentent sous la forme d'enregistrements papier du niveau sur une semaine où on discerne la marée et une composante météorologique. Les supports disponibles sont souvent de mauvaise qualité et dépourvus de renseignements sur la référence de mesure verticale.

Aussi afin de capitaliser ces données et d'améliorer les connaissances, la DREAL Languedoc-Roussillon a confié au CETE Méditerranée une opération de récupération et d'analyse de tous les supports existants.



Exemple de données papier : enregistrement papier réalisé à Sète lors de la tempête de 1997

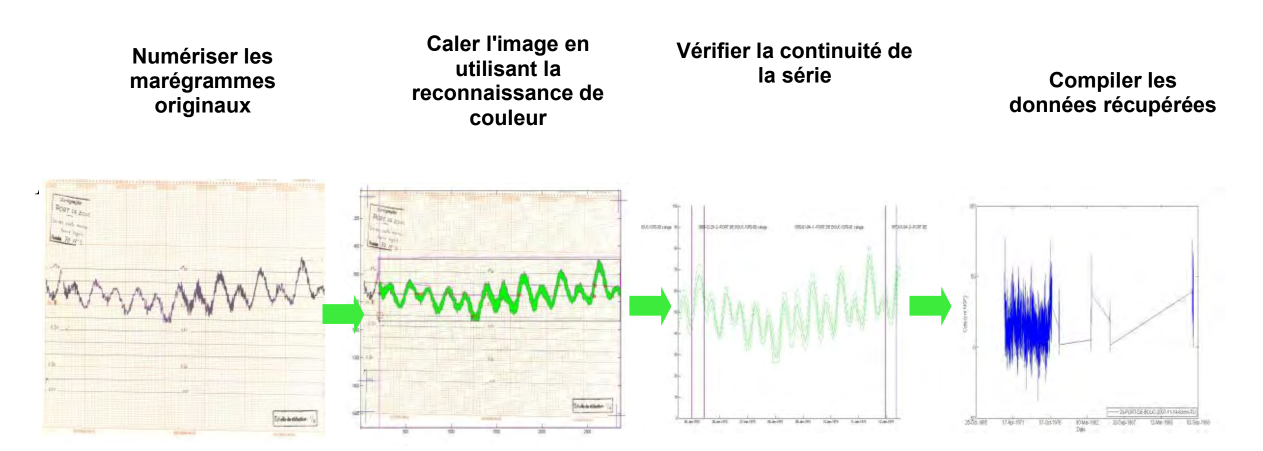
La démarche a ainsi eu pour objectifs de :

- numériser les marégrammes papier originaux
- recaler en temps et en hauteur les données afin de valider les signaux obtenus
- déterminer la qualité de ces données et préciser les utilisations possibles des différentes séries
- analyser les signaux et réaliser une étude statistique

La récupération des données

La méthode de numérisation
Le travail de récupération a été réalisé grace au développement du logiciel NUNIEAU (en téléchargement libre sur le site www.cete-mediterranee.fr) par le CETE Méditerranée. Basé sur la reconnaissance d'une bande de couleur, il permet de récupérer le niveau moyen de la mer et la gamme de fluctuation. Près de 150 ans de données cumulées dans le Golfe du Lion et des séries de plus de 30 ans sont désormais disponibles.

Au final ce sont près de **7 500 marégrammes** qui ont été numérisés suivant la méthodologie suivante :

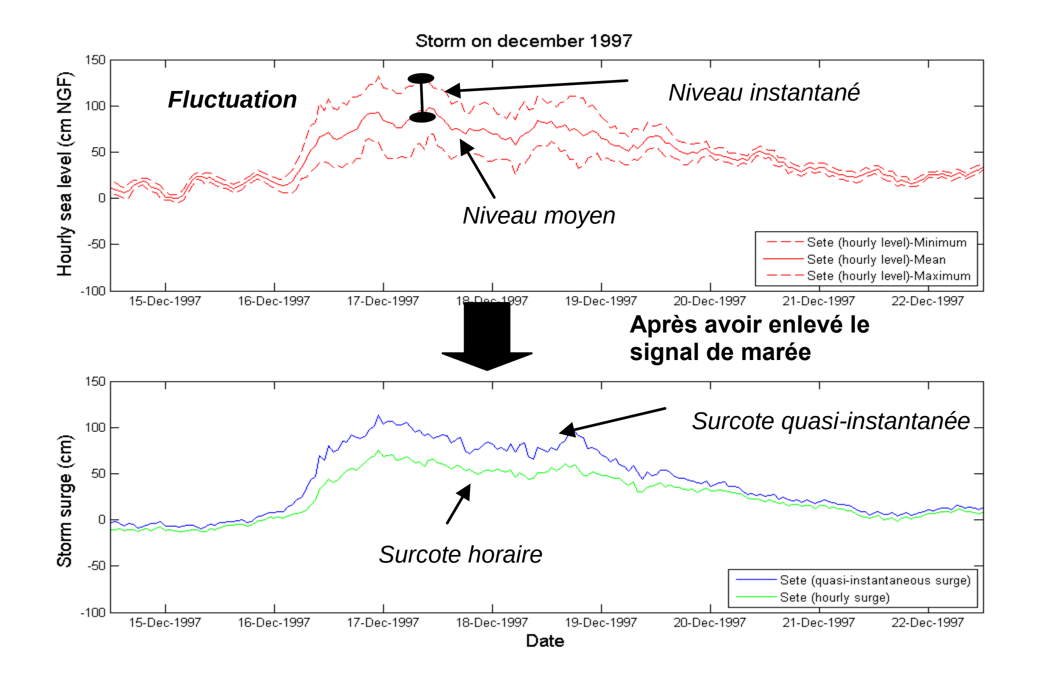


Un important travail de vérification de la fiabilité de ces données a été réalisé afin de déterminer les utilisations possibles de ces données : étude des niveaux historiques et des surcotes, analyse statistique, élévation du niveau marin. Ce travail a été basé sur l'analyse de la stabilité des composantes de marée en phase et en amplitude. Cela a permis de corriger les séries.

Le calage altimétrique (différent de la vérification de l'amplitude) a été réalisé en comparant les données moyennes entre différentes les stations. Des résumés ont été produits pour chaque série permettant de qualifier les données. Le traitement de ces données a permis une analyse des évènements historiques du Golfe du Lion.

L'analyse des données

Des analyses statistiques classiques ont été réalisées sur les stations de mesure présentant des durées d'observations longues sur les paramètres suivants : le niveau moyen, le niveau instantané, la surcote horaire, la surcote instantanée et la fluctuation horaire du niveau du plan d'eau.



Conclusion

Cette communication illustre une méthodologie reproductible de reconstitution des séries de mesure de niveaux marins qui permet de mener les analyses relatives à l'élévation du niveau marin et aux surcotes. Ce type de traitement est indispensable à la validation des résultats des modèles numériques prédictifs.

L'utilisation du logiciel NUNIEAU (disponible en téléchargement) pour le traitement d'autres types de données (pluviométrie, température, jauge fluviale) est en outre tout à fait envisageable. Des actions complémentaires visant à la récupération d'autres signaux dans le Golfe du Lion sont en cours afin d'étendre l'historique des séries.

Références

CETE Méditerranée (2010). Rapports d'étude pour le compte de la DREAL Languedoc-Roussillon :

1) *Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion – Partie homogénéisation – Recalage temporel*
2) *Analyse historique des séries marégraphiques du Golfe du Lion*
3) *Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion – Extraction et étude statistique des évènements de référence*

Rapports téléchargeables sur le site web de la DREAL LR : URL : http://www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=1614

LE HAVRE : UNE VILLE COTIERE SOUMISE AUX SUBMERSIONS MARINES ET AUX INSTABILITES DE FALAISES LITTORALES

Sylvain ELINEAU[1], Anne DUPERRET[1], Pascal MALLET[2], Rémi CASPAR[3]

1. Université du Havre, FRE 3102 CNRS LOMC, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, 53 rue de Prony BP540, 76058 Le Havre cedex, France, sylvain.elineau@univ-lehavre.fr, anne.duperret@univ-lehavre.fr
2. Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH), Direction pour l'Information sur les Risques Majeurs, Hôtel d'Agglomération, 19 rue Georges Braque, 76085 Le Havre Cedex, France, pascal.mallet@agglo-havraise.fr
3. Météo-France, station du Havre, Quai des Abeilles, 76600 Le Havre, France, remi.caspar@meteo.fr

Le Havre est une ville côtière, située sur les bords de la Manche, dans le département de la Seine-Maritime (Haute-Normandie). Cette ville a été construite en partie sur les alluvions de l'estuaire de la Seine constituant la ville basse et sur les falaises de craie du bassin de Paris formant la ville haute (Fig. 1). La Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH) regroupe près de 250 000 habitants sur un territoire soumis à plusieurs risques d'origine naturelle et technologique.

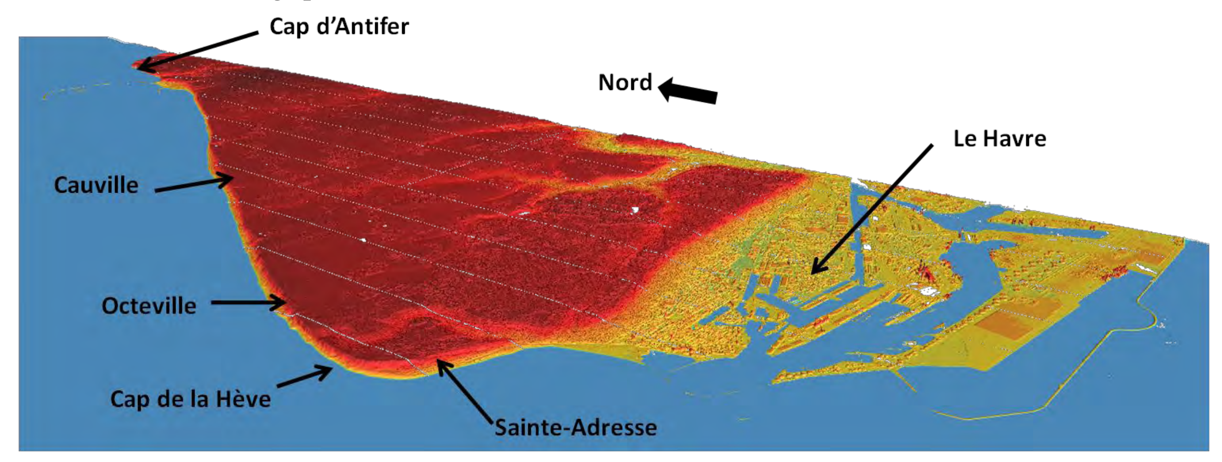


Figure 10: Modèle Numérique d'Elévation réalisé à partir des données de laser aéroporté (LIDAR) de 2006 (source : Ville du Havre, Grand Port Maritime du Havre (GPMH) et la Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH))

L'objectif de l'étude est de mieux comprendre quel type de paramètre peut donner lieu à un aléa naturel et conduire à une situation de risque sur le territoire du Havre. Les aléas sont liés à l'érosion des falaises de craie qui s'étendent sur une vingtaine de kilomètres en zone littorale au nord du Havre et aux submersions marines de la ville basse du fait de la présence de bassins portuaires d'eau de mer situés en centre ville.

1. Les submersions marines au Havre

La ville basse du Havre est caractérisée par la présence de bassins maritimes reliés entre eux par des sas ou des écluses. Certains d'entre eux directement connectés à la mer (Fig. 2) subissent des variations naturelles de hauteurs d'eau marine réduites par régulation en fonction du marnage.

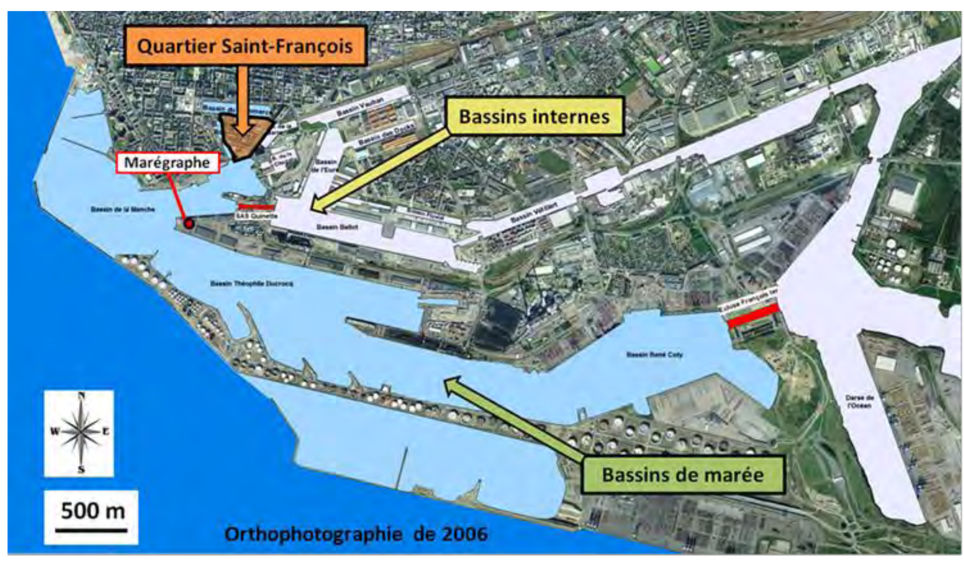


Figure 2 : Orthophotographie de la ville basse du Havre acquise en 2008 par la ville du Havre en collaboration avec le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) et la Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH)

La présence de ces bassins rend le centre ville du Havre sensible au risque de submersion marine comme en témoigne la vulnérabilité historique (inondations de 1981, 1983 et 1984) du quartier Saint-François, qui forme une île artificielle entourée de bassins.
L'analyse historique des conditions marégraphique et météorologique enregistrées lors des événements extrêmes ayant entraîné des débordements de bassins et donc une inondation partielle de la ville du Havre a été réalisée.

La plus haute hauteur d'eau a été enregistrée au Havre au cours de la nuit du 23 au 24 novembre 1984 avec 9,28 m entraînant l'inondation d'une partie de la ville et plus particulièrement le quartier Saint-François. L'inondation s'est déroulée en deux étapes (Fig. 3). (1) L'arrivée d'une dépression atmosphérique du sud-ouest pendant le flot a entraîné une baisse rapide de la pression atmosphérique de plus de 10 kPa en 6 h. Ces conditions ont conduit à une surcote de 1,30 m. (2) Le retour d'une pression atmosphérique plus haute après le passage de la dépression, accompagné d'un renforcement et d'une réorientation vers l'ouest des vents dominants ont créé une seconde surcote, atteignant 1,40m. Dans la mesure où cette seconde surcote, a eu lieu durant la tenue du plein, elle a causé une inondation.

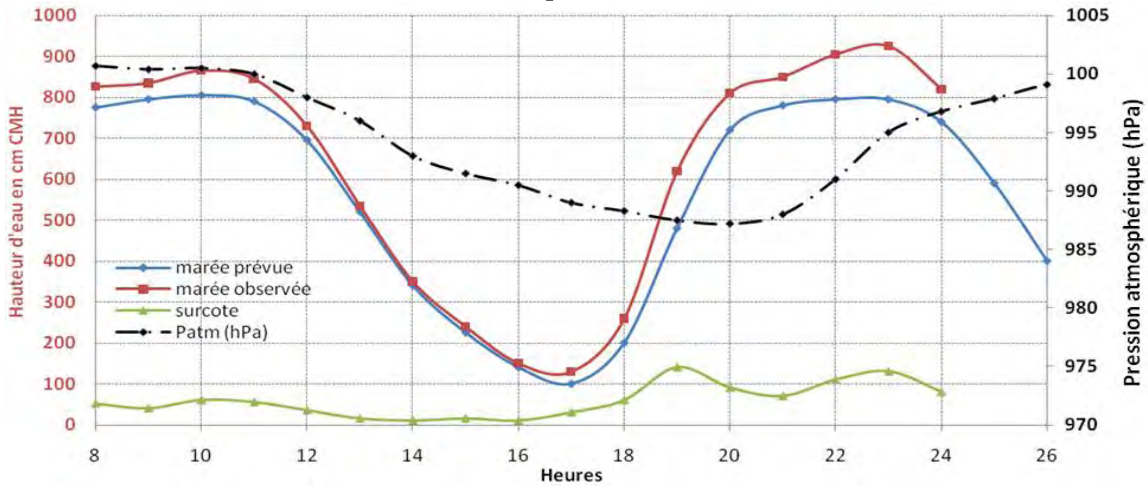


Figure 3 : Analyse de l'inondation au Havre du 23 et 24 novembre 1984

Après cette inondation, des murets de protection ont été installés autour des zones les plus sensibles, surélevant le bord des bassins de 50 cm. Depuis 1984, aucune submersion marine n‘a affecté la ville basse du Havre. Cependant, lors de la tempête Xynthia, une surcote, à quelques centimètres du débordement, a également affecté les bassins portuaires de la ville.

2. L'érosion des falaises littorales

Les falaises littorales du secteur côtier situées au nord du Havre, entre les caps de la Hève et d‘Antifer, subissent une déformation gravitaire par glissement très lent vers la mer, guidé par les couches argilo-sableuses situées en pied de falaise (Le Cossec, 2010). Cette déformation lente provoque une déstabilisation du sommet de la falaise et la perte de terrains côtiers par effondrement de surface, ainsi que l‘accumulation de dépôts sédimentaires en pied de falaise (Fig. 4).



Figure 4: Modèle Numérique de Terrain drapé de l'orthophotographie de 2006, secteur d'Octeville (source : Ville du Havre, GPMH, CODAH)

Ces dépôts de pied de falaise sont régulièrement érodés par l‘action de la mer, par rognage lors des marées hautes de vives-eaux et des tempêtes, ce qui se traduit sur le long terme par un recul du trait de côte.
L‘acquisition de données de laser aéroporté (LIDAR) et d‘orthophotographies réalisées en 2006 et 2008 par la ville du Havre en collaboration avec le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) et la Communauté de l‘Agglomération Havraise (CODAH) permet d‘étudier avec une précision de 20 cm l‘évolution du trait de côte. Ces données nous permettront de quantifier précisément le taux d‘érosion de ce secteur de falaise littorale.
Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) et d‘Elévation (MNE) générés à partir de ces données permettent d‘obtenir un comparatif dans le temps et l‘espace du profil de falaise.

Ces données ont permis de mettre en évidence une évolution morphologique du pied de falaise du nord au sud. Au Sud, au niveau du Cap de la Hève (Sainte-Adresse), le pied de falaise s‘étend sur plus de 100 mètres et a une hauteur d‘environ 30 mètres. Ce pied de falaise se réduit progressivement en allant vers le nord jusqu‘à disparaître après le Cap d‘Antifer. La quantification des volumes glissés et accumulés en pied de falaise permettra de calculer les taux d‘érosion sur le secteur.

3. Le niveau marin au Havre

L‘altimétrie satellitaire Topex/Poséidon et Jason (Cazenave et al., 2008) donne une augmentation du niveau marin moyen à échelle globale de 3,1 +/- 0,4 mm/an ce qui permet

une prévision d'élévation du niveau marin de 18 à 59 cm d'ici la fin du XXIe siècle selon les scenarii (GIEC, 2007).
Le marégraphe du Havre situé à l'entrée du port, enregistre les niveaux d'eau depuis 1938. Ces données sont continues et complètes à partir de 1972, ce qui représente plus de 350 000 données horaires, soit 40 ans d'enregistrement.
L'analyse des hauteurs d'eau permet de déterminer une tendance d'augmentation de 2 mm/an au Havre en prenant en compte une donnée moyennée par an. Alors qu'elle est de 1,75 mm/an en prenant en compte une donnée moyennée par jour. Ces résultats sont en accord avec l'estimation de Pirazzoli et al. (2006) sur le marégraphe du Havre, réalisée à partir de données annuelles sur la période 1938-2002, et qui prévoie une augmentation du niveau marin de 1,8 +/- 0,4 mm/an.

Conclusion

L'augmentation de 1,75 mm/an du niveau marin observée sur le marégraphe du Havre est en accord avec le scénario « optimiste » du GIEC 2007 qui prévoit une augmentation générale du niveau marin d'environ 20 cm sur la période 2000 à 2100.
Une augmentation du niveau marin sous l'effet d'un changement climatique global peut avoir un effet direct sur le risque de submersion marine de la ville du Havre. Cet effet peut-être particulièrement inquiétant pendant les périodes où différents phénomènes conduisant à des surcotes locales sont combinés (marée haute de vives-eaux, dépression atmosphérique, tempête avec vent d'afflux…).
Concernant l'évolution du trait de côte rocheux, une augmentation globale du niveau marin pourrait favoriser les effets de rognage du dépôt de pied de falaise, lors des niveaux marins hauts (marée haute couplée à un épisode de tempête). Nous chercherons à quantifier l'effet précis des variations d'une hauteur de niveau d'eau en pied de falaise pour mieux spécifier son impact direct sur les modalités d'érosion du trait de côte et son impact sur l'érosion.

Références

Caspar R., Costa S. et Jakob E., 2007, Fronts froids et submersions de tempête dans le nord-ouest de la France, *La Météorologie*, n°57, p 37-47.

Cazenave A., Lombard A., Llovel W., Present-day sea level rise: A synthesis, Comptes Rendus Géoscience,Volume 340, numéro 11, pages 761-770 (novembre 2008)

GIEC, 2007, Bilan 2007 des changements climatiques. *Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième, Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.*

Le Cossec J., 2010, La déformation gravitaire des côtes à falaises sédimentaires. Modélisations numériques et expérimentales du secteur côtier Le Havre-Antifer (Haute-Normandie)., *Thèse de doctorat de l'Université du Havre,* 17 septembre 2010.

Mortimore R.N. & Duperret A. (eds), *Coastal chalk cliff instability,* Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 20 , pp.139-148.

Pirazzoli P.A., Costa S., Dornbusch U., Tomasin A., Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel, 2006, *Ocean Dynamics*, n°56, pp.498-512.

Tomasin A. et Pirazzoli P. A., 2008, Extreme sea level in English Channel: Calibration of joint probability method, *Journal of Coastal Research*, n°24-4C, p 1-13.

LE LITTORAL DES COTES D'ARMOR ENTRE EROSION MARINE ET CONTINENTALE

Chantal Bonnot-Courtois

UMR 8586 PRODIG, CNRS
Laboratoire de Géomorphologie et Environnement littoral. EPHE.
15, boulevard de la mer. 35800 DINARD
chantal.bonnot@ephe.sorbonne.fr

Résumé :
Le recul à long terme du trait de côte associé à une montée du niveau de la mer implique une analyse détaillée des aléas et des enjeux pour la mise en place d'une gestion durable des zones côtières dans les départements littoraux confrontés aux problèmes d'évolution du trait de côte. Dans ce cadre, une étude sur les risques littoraux liés à l'érosion côtière a été engagée par le Service Prospective, Planification et Contrôles de la DDE des Côtes d'Armor pour l'ensemble du linéaire côtier du département. Les objectifs de cette étude concernent l'analyse de la géomorphologie du trait de côte, la caractérisation de l'aléa « érosion » et l'évaluation de la vulnérabilité sur des secteurs sensibles. En premier lieu, la cartographie au 1/10000ème des principales caractéristiques du littoral : géomorphologie du trait de côte, paramètres morpho-dynamiques, aménagements, types d'aléa, a été réalisée pour les 49 communes littorales du département. Elle a permis de discriminer l'origine marine, continentale ou anthropique des facteurs d'érosion et de pointer les secteurs particulièrement sensibles. Ceux-ci ont fait l'objet d'une analyse détaillée de la vulnérabilité, mise en évidence par des cartographies au 1/5000ème des enjeux montrant l'occupation des parcelles cadastrales et l'usage du sol dans la bande littorale des 200 mètres et permettant une meilleure définition du risque « érosion côtière ». De cette analyse découlent des préconisations d'aménagements et de gestion de la frange littorale selon chaque type d'aléa.

Introduction

Compte-tenu des risques de submersion induits par un recul à long terme du trait de côte associé à une montée du niveau de la mer, l'étude du risque « érosion côtière » englobe nécessairement une évaluation de la vulnérabilité mais aussi, et en amont, une analyse précise des aléas. La synthèse des données des Schémas de Mise en Valeur de la Mer Trégor-Goélo (PINOT, 1993, 1997) et Baie de Saint-Brieuc (BONNOT-COURTOIS & LAFOND, 1995) couplée à l'actualisation sur le terrain de l'état du trait de côte a conduit à une caractérisation de l'aléa sur l'ensemble du linéaire côtier du département des Côtes d'Armor. Les paramètres représentés sur les cartes concernent la géomorphologie du trait de côte et les caractéristiques morpho-dynamiques du littoral, les aménagements et le type d'aléa correspondant aux principaux facteurs d'érosion, qu'ils soient d'origine marine, continentale ou anthropique. La cartographie synthétique a été réalisée sur le fond de carte Top 25 de l'IGN à une échelle de travail du 1/10 000ème pour un rendu cartographique au 1/25 000ème (BONNOT-COURTOIS & LANÇON, 2004).

Résultats

Au total, 19 cartes couvrant l'ensemble du littoral du département ont permis de caractériser les principaux types géomorphologiques de côtes : falaises rocheuses ou meubles ; cordons littoraux, flèches, massifs dunaires, estrans vaseux. Les aménagements sont représentés par des figurés spécifiques selon le type de protection : épis et cales, digues,

enrochements, installations portuaires, protections ponctuelles de particuliers, aménagements légers de brise-vent dans les dunes (Fig. 1A).

L'aléa est figuré sous forme de tiretés dans le tracé des faciès géomorphologiques, si le littoral présente une dégradation. L'orientation préférentielle des vagues à la côte est indiquée lorsque l'action des houles prédomine sur le secteur côtier considéré. Les problèmes d'érosion continentale liée à l'éboulement des falaises, qu'elles soient rocheuses ou meubles, sont figurés par des étoiles dont la taille est proportionnelle à l'ampleur de l'érosion. Sont également figurés par des symboles spécifiques la surfréquentation des massifs dunaires et les zones basses de marais maritimes potentiellement inondables.

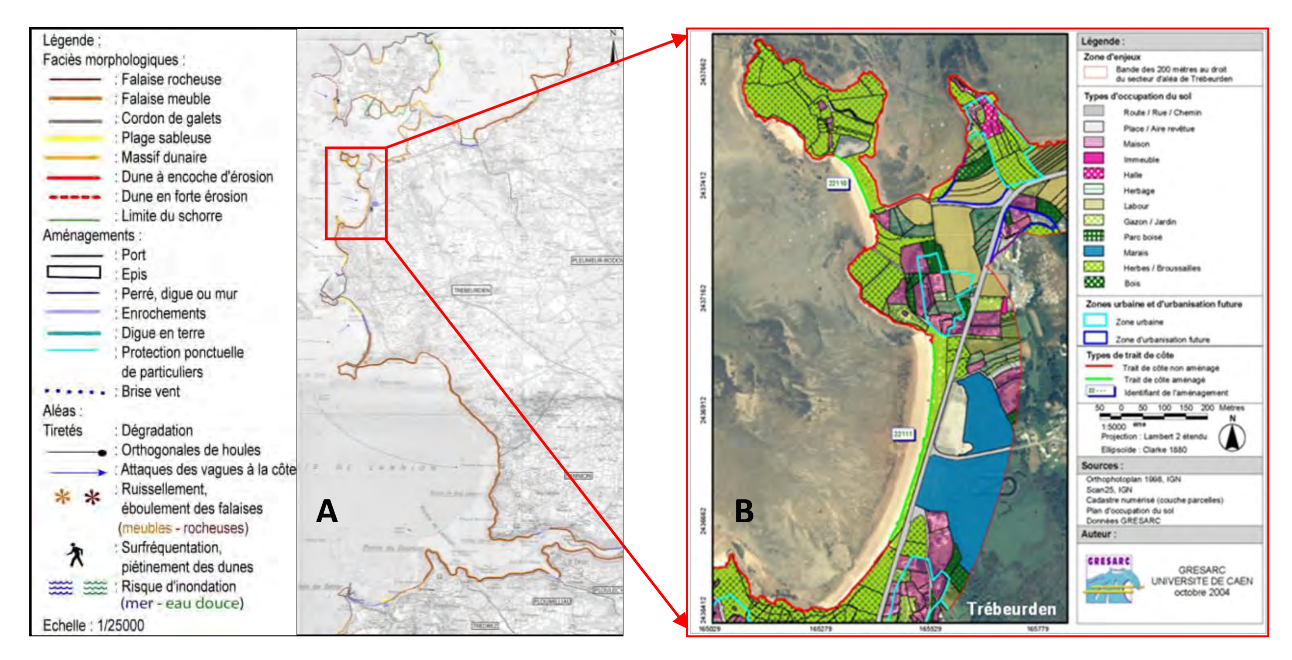


Fig. 1 ***A*** *: Géomorphologie côtière et aléa (1/25000), secteur de Lannion à Pleumeur Bodou*
B *: Occupation et usage du sol (1/5000), commune de Trébeurden*

La cartographie détaillée (échelle 1/5000ème) des enjeux sur 15 sites particulièrement sensibles présente pour chaque secteur, deux cartes distinctes réalisées sur la bande littorale des 200 mètres: une carte de l'occupation du sol (Fig. 1B) présentant la physionomie des parcelles cadastrales et une carte de l'usage du sol précisant la fonction des enjeux.

Les aléas cartographiés correspondent soit à l'érosion marine dans les secteurs les plus exposés aux houles, soit à l'érosion continentale pour les effondrements des falaises meubles, soit encore à l'érosion anthropique au niveau de la fréquentation des massifs dunaires et de l'impact d'ouvrages longitudinaux de défense qui fragilisent les plages. La cartographie synthétique des données morpho-sédimentaires, des facteurs dynamiques et des tendances évolutives du littoral a permis d'identifier les sites les plus sensibles (Fig. 2).

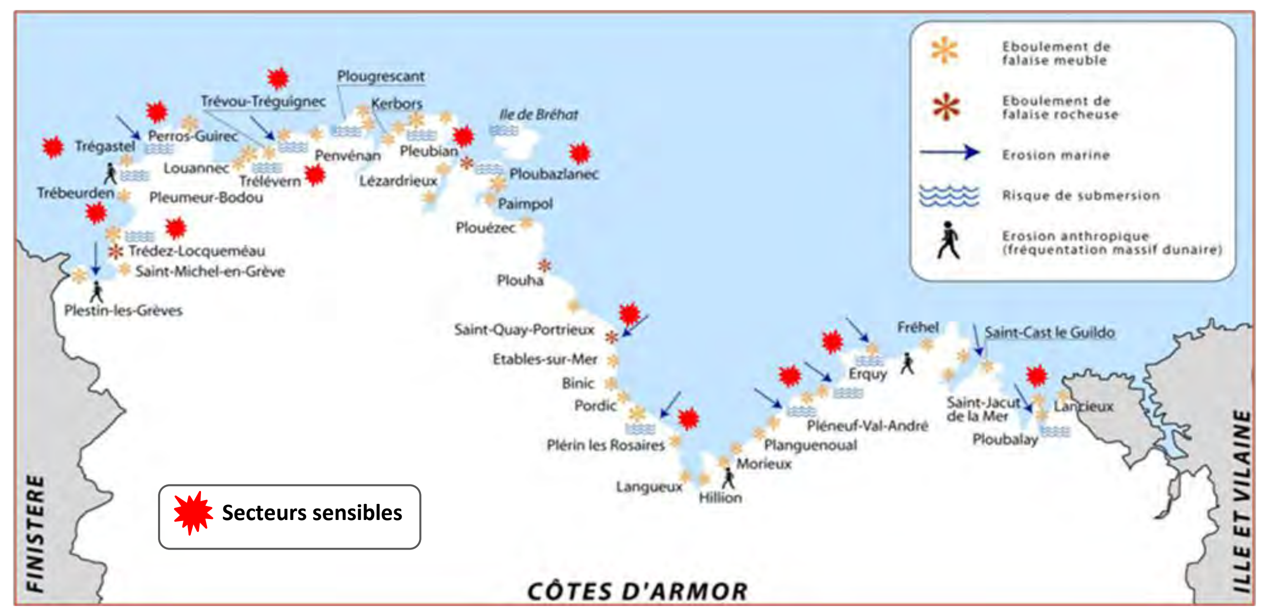


Fig. 2 : Caractérisation de l'aléa érosion sur l'ensemble du littoral du département.

Sur les 49 communes littorales du département, 35 d'entre elles présentent des problèmes d'érosion sur un ou plusieurs secteurs de leur trait de côte. La très grande majorité de l'aléa concerne l'instabilité des falaises meubles, le plus souvent d'origine continentale (Fig. 3). S'y ajoutent l'érosion des plages, d'origine marine, et l'aléa submersion soit au niveau des zones basses de marais maritimes, soit par franchissement des ouvrages de protection dont l'altimétrie est trop basse par rapport aux niveaux extrêmes.

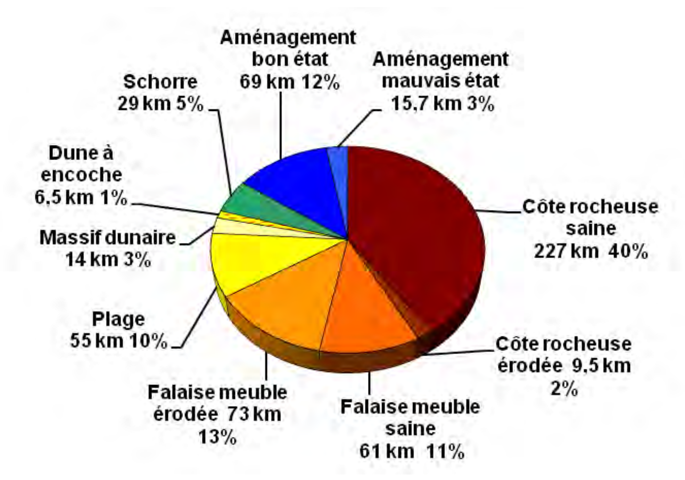


Fig. 3 : Répartition de l'aléa érosion selon le type morphologique de côte sur l'ensemble du littoral des Côtes d'Armor

Synthèse et conclusion

Les falaises rocheuses représentent 40% du linéaire côtier du département mais aucun problème majeur d'érosion côtière n'affecte ces formations très anciennes et très résistantes.

Les falaises meubles, taillées dans les formations périglaciaires qui ont nappé de grandes surfaces du socle ancien particulièrement sur l'ensemble de la côte Nord de la Bretagne, ne sont pas résistantes à l'attaque de la mer mais subissent également une érosion continentale liée aux infiltrations d'eau dans le sol. Ces falaises meubles évoluent assez rapidement et la majorité des aléas a été recensé dans ce type de faciès sur l'ensemble du littoral du département. L'érosion de ces falaises, d'origine continentale, est liée aux

éboulements provoqués par la saturation en eau des formations meubles La construction de murs de soutènement au pied de ces falaises ne suffit généralement pas à éviter la poursuite de l'érosion si l'évacuation de l'eau n'est pas prévue. Ainsi, à Porz Hir et à Porz Even des murs de protection ont été basculés sur la plage sous la pression que les formations meubles exercent sur la face interne des murs (Fig. 4). Cet aléa érosion continentale concerne plusieurs secteurs à enjeux significatifs car le sommet des falaises est parfois entièrement urbanisé



Fig. 4 : Instabilité des falaises meubles quaternaires, destruction des murs de soutènement.

Dans les Côtes d'Armor, les cordons littoraux, plages adossées, et flèches sableuses, surmontées ou non de massifs dunaires se rencontrent très fréquemment sur l'ensemble du département. Soit les plages sont petites et à l'écart des stations balnéaires et elles ne sont généralement pas aménagées et ne présentent pas de gros problèmes de démaigrissement. Soit les plages sont situées aux abords ou dans les stations balnéaires et, dans ce cas, elles sont presque toutes bordées par un ouvrage longitudinal de haut de plage. Ces ouvrages ont été construits pour permettre l'urbanisation au plus près de la mer ou pour faire face à l'érosion des falaises qui servent d'ados. Un fort démaigrissement de la plage est observé sur de nombreux sites exposés aux houles et donc soumis à l'aléa érosion marine. Il peut s'y ajouter un aléa submersion par franchissements des ouvrages qui bordent le trait de côte lorsque les aménagements n'atteignent pas une cote d'arase suffisante.

La fragilisation des massifs dunaires par leur sur-fréquentation ou par la fixation de leur versant littoral par des enrochements augmente le recul de la dune et l'érosion marine par la houle se renforce sur la haute plage et le front dunaire. Une rupture et/ou un franchissement du cordon littoral peuvent alors provoquer la submersion des zones humides situées en arrière dont le niveau topographique est inférieur à celui des pleines mers de vive-eau. Par ailleurs, certains secteurs de fond de baie où se développent des marais maritimes ont été endigués depuis deux siècles. Les digues anciennes qui ceinturent les polders potentiellement inondables sont souvent en mauvais état ce qui augmente le risque de submersion marine comme cela s'est produit en 1990 et en 2006.

Références :

Bonnot-Courtois C. & Lafond L.R. (1995) – SMVM Baie de Saint-Brieuc : Etude sur l'évolution des rivages de la baie de Saint-Brieuc entre Tréveneuc et Plurien – *DDE Saint-Brieuc*, 128 p.

Bonnot-Courtois C. & Lançon G. (2004) – Erosion littorale – Evaluation du risque. Caractérisation de l'aléa érosion sur le littoral des Côtes d'Armor. *Rapport UMR 8586 CNRS PRODIG/ DDE 22*. 30 p. 19 cartes.

Pinot J.P. (1993) – L'évolution du littoral autour de la baie de Lannion et sur la côte de Granit Rose, S.M.V.M – *DDE 22*, 120 p.

Pinot J.P. (1997) – Rapport sur les risques liés à l'évolution du littoral entre Penvénan et Plouha, SMVM – *DDE 22,* 123 p.

VULNERABILITE DU TERRITOIRE NATIONAL AUX RISQUES LITTORAUX

Céline, Perherin[1], Amélie, Roche[1], Céline, Trmal[2], Isabelle, Roux[2], Frédéric, Pons[2], Céline, Boura[3], Emmanuel, Devaux[3], Guy, Désiré[3]

[1] Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
155, rue Pierre Bouguer - BP 5 - 29 280 Plouzané - France
Celine.Perherin@developpement-durable.gouv.fr
Amelie.Roche@developpement-durable.gouv.fr
[2] Centre d'Études Techniques de l'Équipement Méditerranée
CS 70499- 13 593 Aix-En-Provence Cedex 3 - France.
Celine.Trmal@developpement-durable.gouv.fr
Isabelle.Roux@developpement-durable.gouv.fr
Frederic.Pons@developpement-durable.gouv.fr
[3] Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest
M.A.N. - Rue René Viviani - BP 46 223 - 44 262 Nantes Cedex 2 - France.
Celine.Boura@developpement-durable.gouv.fr
Emmanuel.Devaux@developpement-durable.gouv.fr
Guy.Desire@developpement-durable.gouv.fr

Abstract :
"French national territory vulnerability to coastal risks" is a study led by CETMEF in close collaboration with two French public engineering centres (CETE Méditerranée and CETE de l'Ouest). The main objectives were to summarize coastal hazards vulerability knowledge and to map and estimate the expanse of the current French areas vulnerable to coastal hazards. This assessment is necessary to estimate climate change impacts. The fisrt part of the study, run in 2008-2009, was about metropolitan France and the second part, in progress, is about French overseas territory.
Firstly the main regional-scaled studies were summarized to give general trends. Secondly different risk indicators, based on the analysis of public national databases (national statement of natural disaster, extreme sea level and elements at risk as constructions, infrastructures or protected areas...), were determined, mapped and combined to quantify vulnerability.

1. Introduction

L'étude "Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux" a été lancée par le CETMEF en 2008, en partenariat avec les Centres d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) de Méditerranée et de l'Ouest, afin de disposer, sur la France métropolitaine, les DOM et les COM, d'une synthèse nationale des connaissances actuelles sur les risques littoraux, d'identifier les secteurs les plus vulnérables et d'évaluer ceux qui seront les plus susceptibles d'être impactés par l'élévation du niveau marin. Cette étude s'est déclinée en deux parties, une synthèse bibliographique d'une part, et la définition de méthodes permettant de quantifier la vulnérabilité et d'établir une représentation des principales zones vulnérables d'autre part.

2. Synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique a permis d'estimer l'état des connaissances sur les risques littoraux et de faire une synthèse nationale de la vulnérabilité. Elle s'est appuyée sur les rapports d'études menées à l'échelle régionale ou départementale, et traitant de la submersion marine et l'évolution du trait de côte, des enjeux, de la gestion du littoral et des méthodes de protection ou de la vulnérabilité du littoral liée au changement climatique.

Les informations disponibles le long des côtes françaises ne sont pas homogènes. Certains secteurs ont fait l'objet de multiples études alors que d'autres sont peu traités. Cinq régions se dégagent, le Nord–Pas-de-Calais, la Haute-Normandie, la Basse-Normandie, la Bretagne et les Pays de La Loire où la connaissance de la vulnérabilité aux risques littoraux est approfondie, s'expliquant par des aléas littoraux très présents ainsi qu'une volonté politique forte.

3. Indicateurs de vulnérabilité aux risques littoraux

Afin d'établir une représentation simple de la vulnérabilité aux risques littoraux, plusieurs indicateurs cartographiques, exploitant les bases de données présentant des informations homogènes à l'échelle nationale, ont été déterminés :

- le niveau de connaissance des risques littoraux par région, déterminé à partir de la synthèse bibliographique ;
- les zones basses : zones topographiques situées sous un niveau marin de référence ;
- le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle liés à la mer par commune ;
- la présence de documents règlementaire ou d'information liés à la mer sur une commune comme les Atlas de Zones Inondables et les Plans de Prévention, données issues de la base de données nationale GASPAR ;
- les enjeux situés dans les zones basses, rendant ainsi compte d'un degré de vulnérabilité à la submersion marine : infrastructures de transports routier et ferroviaire et constructions (issus de la BD Topo® de l'IGN), sites d'intérêt écologique issus du Réseau Natura 2000, établissements industriels à risque (classés SEVESO et centrales nucléaires) ont ainsi été recensés dans les zones basses précédemment identifiées ;
- un indicateur croisé, Intensité du Bâti situé dans les zones basses des communes ayant fait l'objet d'un arrêté de Catastrophe naturelle lié à la mer (indicateur IBC).

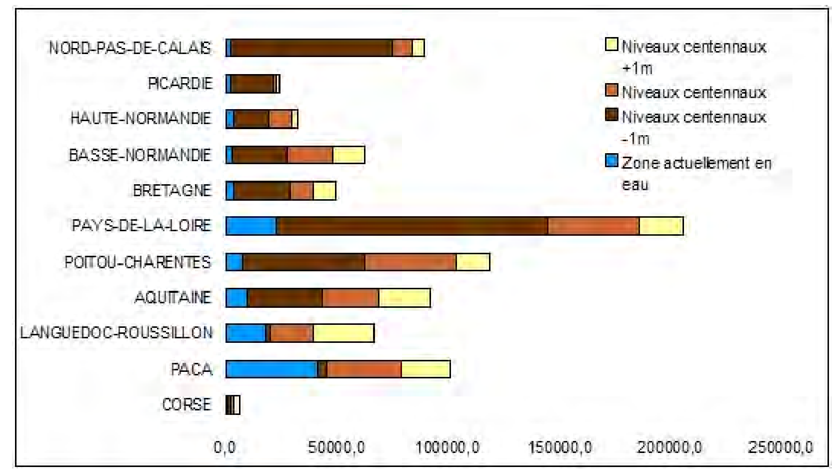
3.1 L'indicateur Zones basses

La cartographie des zones basses, zones topographiques situées sous un niveau marin de référence, méthodologie reprise du guide méthodologique "Plans de Prévention des Risques Littoraux" (MATE & METL, 1997) pour la cartographie l'aléa submersion marine, est un indicateur de la vulnérabilité du territoire aux submersions marines. Les zones basses obtenues sont cependant distinctes des zones inondables. Elles sont définies sans tenir compte des ouvrages de protection. De plus, seule une approche statique est adoptée (non prise en compte de la tenue du niveau de pleine mer et des franchissements).
La cartographie des zones basses a été réalisée à partir :

- du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la BD Topo® de l'IGN,
- du trait de côte Histolitt (IGN-SHOM),
- des niveaux marins centennaux issus d'une part, de l'étude SHOM-CETMEF (SIMON, 2008) pour les côtes Atlantique-Manche, et, d'autre part, de la bibliographie pour la Méditerranée.

Compte-tenu de l'incertitude altimétrique du MNT,estimée à ± 1m, et afin d'étudier le possible impact d'élévation du niveau marin moyen lié au changement climatique (élévation à échéance 100 ans ici retenue : +1m), trois types de zones ont été étudiées, les zones situées sous le niveau marin centennal, sous le niveau marin centennal moins 1 mètre et sous le niveau marin centennal plus 1 mètre, estimant ainsi les variations de surface en fonction des niveaux marins retenus.
D'après les estimations effectuées, en France métropolitaine, 590000 ha sont situés sous les niveaux marins centennaux et 735500 ha sont situés sous les niveaux marins centennaux + 1m. Les régions dont les surfaces de zones basses sont les plus importantes sont les Pays de la Loire, le Poitou-Charentes et le Nord–Pas-de-Calais. Les régions PACA, Aquitaine et

Languedoc-Roussillon sont celles dont les surfaces de zones basses augmentent le plus avec une élévation du niveau marin.

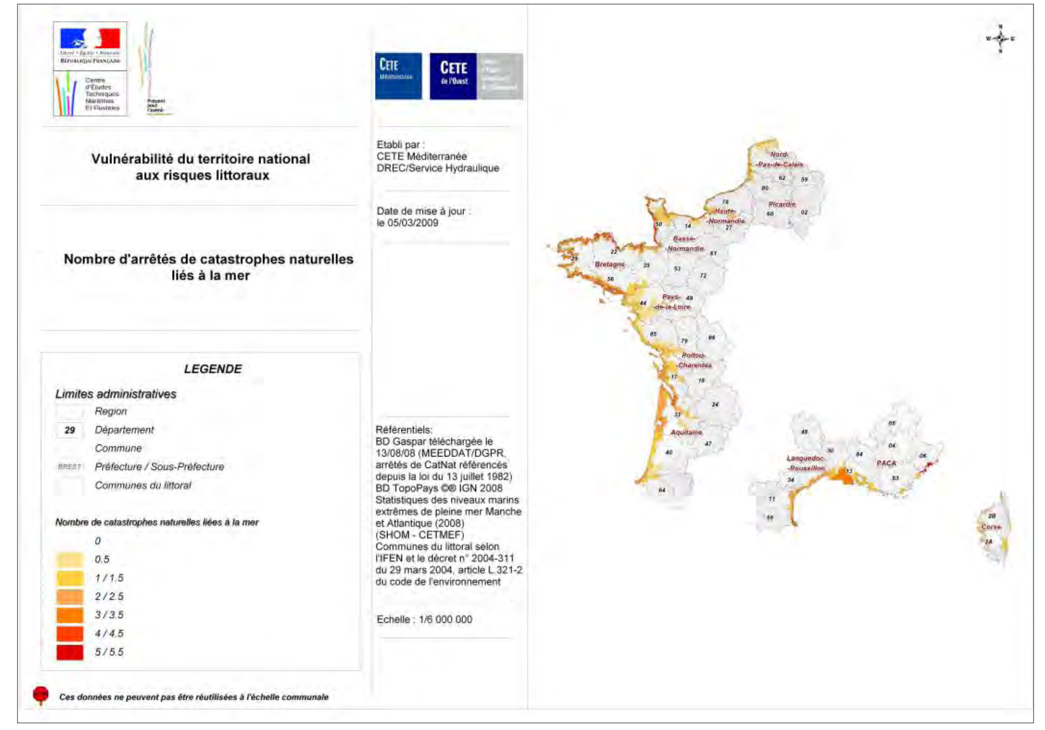


Surfaces des zones basses de France métropolitaine en eau (lacs, étangs...), situées sous les niveaux centennaux, sous les niveaux centennaux -1m et sous les niveaux centennaux + 1m.

3.2 Arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle liés à la mer

La base de données GASPAR (Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques) recense par région les arrêtés inter-ministériels pris lors d'événements exceptionnels reconnus comme catastrophes naturelles. Ces arrêtés constituent un indicateur d'exposition d'une commune à un risque, qui peut être littoral. L'exploitation de cette base de données a permis d'évaluer et de cartographier le nombre d'arrêtés par commune liés à l'action de la mer.

Pour cela, un premier travail sur la terminologie des risques inscrits dans la base a été réalisé afin d'identifier les aléas qui sont liés à la mer (chocs mécaniques liés à l'action des vagues), d'exclure les aléas non littoraux (avalanches, séismes,...) et de conserver ceux qui peuvent être liés à l'action de la mer (tempête, inondations,...). Seuls les arrêtés concernant les communes situées dans les zones basses ont ensuite été retenus.

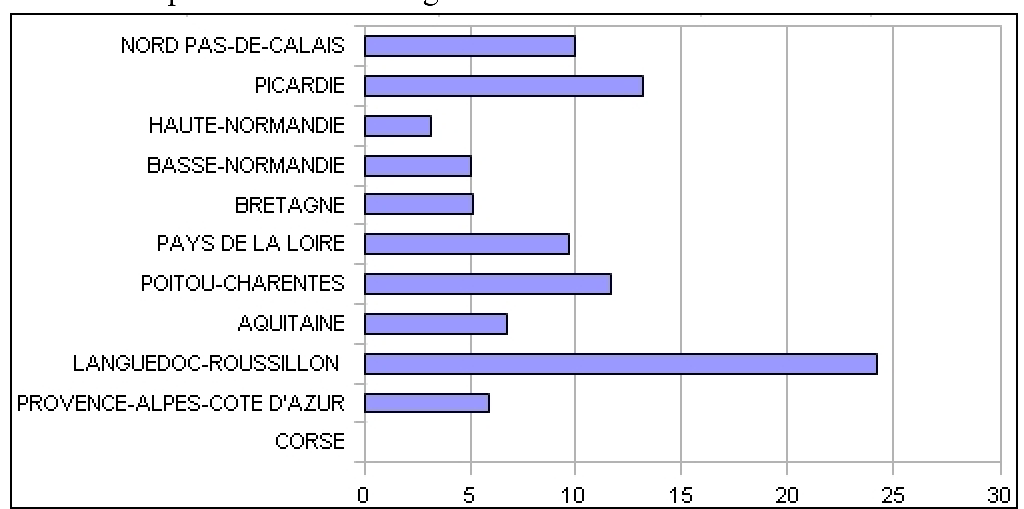


Carte de France métropolitaine des arrêtés de catastrophes naturelles liés à la mer.

3.3 L'indicateur croisé IBC

Un indicateur seul ne donne qu'une image partielle de la vulnérabilité. Pour cartographier la vulnérabilité aux risques littoraux à l'échelle nationale, le croisement des différents indicateurs liés aux aléas et aux enjeux est un élément de réponse. Il a été choisi de croiser les arrêtés de catastrophes naturelles et les bâtiments situés dans les zones basses par commune, en considérant qu'une commune sera plus vulnérable si elle contient un grand nombre de bâtiments et qu'elle a déjà subi de nombreuses catastrophes naturelles d'origine marine. L'indicateur rend donc principalement compte de la vulnérabilité à la submersion marine.

Les régions les plus vulnérables sont celles du Languedoc-Roussillon, de la Picardie, du Poitou-Charentes, du Nord-Pas de Calais et des Pays de La Loire. A l'opposé, les régions Corse, Haute-Normandie, Basse-Normandie et Bretagne sont moins vulnérables. La cartographie a aussi été réalisée pour le bâti sous les niveaux marins centennaux +1 m afin d'évaluer l'évolution de la vulnérabilité avec l'élévation du niveau moyen de la mer. La région où l'évolution est la plus forte est le Languedoc-Roussillon.



Indicateur croisé – Rapport par région du nombre de communes des classes les plus vulnérables sur le nombre de communes situées en zones basses (sous le niveau centennal).

4. Conclusion

L'étude a permis de faire un bilan des éléments disponibles pour faire une synthèse des risques littoraux. La synthèse bibliographique et la production des indicateurs, données quantifiables ayant permis la réalisation de cartes à l'échelle nationale, donnent des informations complémentaires permettant d'identifier les secteurs vulnérables aux risques littoraux et les indicateurs cartographiques permettent également d'identifier les secteurs les plus vulnérables à une élévation du niveau de la mer.

5. Références bibliographiques

CETMEF – CETE Méditerranée – CETE Ouest. (Déc. 2009). *Vulnérabilité du territoire National aux risques littoraux.* Rapport CETMEF/DELCE.163 p.

MATE, METL -Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement- (1997). *Plan de prévention des risques littoraux (PPR). Guide méthodologique.* La documentation française, Paris, 54 p.

SIMON B. (2008). *Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique.* SHOM–CETMEF, Cédérom.

Projet C³E² : Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires

Florence, Cayocca[1] et Pierre, Le Hir[2]

[1]DYNECO/PHYSED, IFREMER, BP70, 29280 Plouzané, fcayocca@ifremer.fr
[2] DYNECO, IFREMER, BP70, 29280 Plouzané, plehir@ifremer.fr

Pour caractériser la réponse des estuaires au changement climatique, un outil de modélisation générique pour estuaires-types est mis en place, et exploité dans de nombreuses configurations et différents scénarios de forçage, incluant des modifications dues au changement climatique (CC). Puisque l'effet de la végétation sur les échanges résiduels des sédiments entre le lit mineur d'un estuaire et le lit majeur est un mécanisme mal connu considéré comme essentiel, une action propre à ce sujet est proposée : elle comprend une analyse bibliographique poussée et un suivi sur le terrain dans l'estuaire de la Loire où des données ont déjà été acquises (Diara, 1984). Profitant de cette expérience en Loire, ainsi que d'une modélisation 3D déjà en place, une étude plus poussée de l'impact du CC dans l'estuaire de la Loire sera réalisée. Enfin une synthèse des résultats sera établie et mise en forme pour un transfert vers les gestionnaires et les acteurs concernés par les environnements estuariens.
Le projet s'articule autour de 5 actions :

- Définition des scénarios de forçage, en France métropolitaine (pour la modélisation générique et pour la modélisation de l'estuaire de Loire),
- Développement et exploitation de modèles génériques d'estuaires,
- Echanges hydriques et particulaires entre lit majeur et lit mineur, rôle de la végétation et investigation spécifique en Loire,
- Impact du changement climatique sur l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Loire,
- Synthèse et transfert vers les gestionnaires.

Définition des scénarios de forçage

La déclinaison à l'échelle régionale des prévisions de changement des forçages issues des simulations du GIEC (techniques de « downscaling ») a fait l'objet de nombreux développements dans la communauté des météorologues (Boé et al., 2006, Christensen et Christensen 2007, Christensen et al., 2008). Ces techniques ont été appliquées à l'échelle de la France (Déqué, 2007, Pagé et al., 2008) ou de bassins versants (Boé, 2007). Des projections climatiques issues de ces approches sont en cours d'étude sur le bassin de la Loire (Vidal et al., 2010), et se font en lien avec le projet GICC DRIAS (APR 2008).
L'application de ces scénarios climatiques permet en particulier l'alimentation de modèles hydrométéorologiques nécessaires à la simulation des évolutions des débits, à l'échelle de la France (e.g. Habets et al., 2008) ou d'un bassin (Kormas et al. 2009 pour la Somme, Ducharne et al. 2007 pour la Seine, en cours d'application sur la Loire, Ducharne et al., 2010).
Les résultats de ces études seront exploités au cours de ce projet, en fournissant des séries chronologiques de débits respectant la variabilité saisonnière et la fréquence des évènements exceptionnels.
Les modèles de prédiction des flux sédimentaires initialement destinés à simuler la variabilité des apports sédimentaires en fonction des changements climatiques à l'échelle de plusieurs milliers d'années (Kettner et Syvitski, 2008), permettent aujourd'hui d'aborder toutes les

échelles, puisqu'ils peuvent prédire des séries temporelles journalières de flux sédimentaires à partir d'un modèle stochastique (e.g. Morehead et al., 2003, Syvitski et Kettner, 2007). Ces prédictions de transport sédimentaire reposent sur des formulations semi-empiriques, et requièrent le paramétrage d'informations moyennées sur le bassin (lithologie, usage des sols, volume des réservoirs susceptibles de piéger des sédiments). Une évaluation de l'adaptabilité d'un modèle de ce type au bassin de la Loire sera faite (en particulier en lien avec les résultats attendus du projet ICC-HYDROQUAL). Des méthodes plus traditionnelles mettant en lien débit solide et débit liquide seront utilisées par ailleurs, et appliquées afin de définir des séries temporelles de flux solide nécessaires aux modèles schématiques comme au modèle de la Loire.
Par ailleurs, des séries chronologiques de régimes de tempêtes à la limite marine seront constituées, pour une utilisation dans les cas où la propagation des vagues aux embouchures est à considérer.

Modèle générique d'estuaire
Il est proposé de mettre en œuvre un modèle morphosédimentaire de type « processus », tel que les partenaires du projet en ont développé depuis plusieurs années. Il s'agit d'un modèle 3D existant, résolvant à la fois l'hydrodynamique estuarienne avec gradients de densité (équations de Navier-Stokes sous approximation hydrostatique) et les transports en suspension simultanés de sable et de vase (Waeles et al., 2007, 2008). Le modèle permet de prendre en compte la consolidation des vases, mélangées ou non à une fraction sableuse. Le couplage morphodynamique est assuré (i.e. évolution bathymétrique en fonction des transports de sédiment), avec ou sans facteur morphologique (amplification des érosions/dépôts par rapport aux sédiments en suspension dans l'eau et aux flux horizontaux, permettant une accélération du temps).
Le modèle sera appliqué à des géométries schématiques (longueur, section à l'embouchure, degré de convergence, rapport zone intertidale/zone immergée, nombre de chenaux, méandrement, répartition des sédiments fins et grossiers, …) et pour de nombreuses configurations de forçages (débits liquides et solides en amont, avec modulation saisonnière plus ou moins accusée, amplitude de marée en aval, élévation du niveau moyen…). Les effets du changement climatique sur ces forçages seront déduits de la déduits de la définition des scénarios de forçage, en prêtant attention au rythme des changements. Le maillage sera assez fin pour permettre de reconstituer des évolutions morphologiques réalistes. L'effet de la végétation des berges et la présence de zones annexes plus ou moins végétalisées, simulant marais et prairies submersibles, seront pris en compte dans le modèle, de façon paramétrique (via le frottement en particulier). Les résultats de mesure et de modélisation en estuaire de Loire seront exploités pour permettre une calibration de ce paramétrage.
Les résultats seront recherchés en termes d'évolution morphologique à plusieurs échelles de temps, et en particulier aux « échéances » de 15 et 50 ans. L'analyse des effets du CC s'exprimera en tendances, soit sous forme de déplacement des équilibres ou au contraire sous forme de rupture et changement de trajectoire des systèmes. D'éventuelles modifications de la distribution des sédiments seront observées. Le fonctionnement des systèmes estuariens en cours d'évolution, avec ou sans changement climatique, sera analysé, en termes hydrodynamiques (courants max, asymétries, temps de transit des masses d'eau) et hydrologiques : remontée des eaux salées dans l'estuaire et sur les berges, intensité et positionnement du bouchon vaseux.
Les incertitudes de la simulation seront évaluées par le biais d'une étude de sensibilité aux principaux paramètres : incertitudes sur les forçages et leur évolution, incertitudes sur les paramètres physiques (frottement sur le fond, comportement du sédiment…) et numériques.

La validation du modèle sera établie en comparant ses résultats aux situations morphosédimentaires que l'on peut observer dans des estuaires dont les conditions de forçage sont connues, comme par exemple l'estuaire de la Loire.
Les résultats seront très nombreux, et une difficulté majeure sera de les présenter et de les synthétiser. Pour pouvoir les classer, il faudra identifier des indicateurs qui soient des descripteurs synthétiques et pertinents du fonctionnement et de l'état physique des estuaires. Ces indicateurs ne sont pas aujourd'hui définis et leur recherche sera un objectif de cette action, qui pourra aider à la caractérisation de l'état et du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire des zones de transition pour la Directive Cadre sur l'Eau.

Echanges hydriques et particulaires entre lit majeur et lit mineur , rôle de la végétation et investigation spécifique en Loire

Cette action s'attachera à caractériser les échanges transversaux dans l'estuaire de la Loire (eau et sédiment) sur la base d'une étude bibliographique (e.g. Diara, 1984 en Loire) et à l'aide de mesures spécifiques (courantomètre mouillé et profileur de turbidité acquis à l'occasion de cette étude). Le profileur est constitué d'une perche munie d'une centaine de capteurs à rétrodiffusion optique, adaptés à la caractérisation de gradients élevés, comme on peut en rencontrer dans les étiers (Diara, 1984). Les flux hydriques et particulaires seront suivis pendant des périodes caractéristiques (de l'ordre du mois) dans un étier représentatif, pour couvrir diverses conditions hydrosédimentaires
Le suivi de la végétation sera organisé le long de plusieurs transects permanents représentatifs de la diversité et de la complexité de la zonation de la végétation de l'estuaire de la Loire et suivis mensuellement pendant une année. Au sein de carrés d'un mètre carré, les paramètres suivants seront mesurés :

- granulométrie du substrat ;
- structure et densité de la végétation, contribution spécifique (mensuellement) ;
- importance des dépôts sédimentaires (mensuellement).

L'analyse de ces données et la recherche de corrélations avec les paramètres hydrosédimentaires feront l'objet d'un travail méthodologique.
Le modèle hydrosédimentaire opérationnel élaboré par SOGREAH pour le compte du GIP Loire a pour but de tester les scénarios d'aménagements à grandes échelles du fleuve dans le cadre du programme Interrégional Loire Grandeur Nature. Il est actuellement employé pour l'évaluation de scénarios de restauration de l'estuaire et des vasières expérimentales en permettant de décrire à une échelle fine les écoulements et les transferts particulaires. Même s'il peut être considéré comme à la pointe de l'état de l'art dans son domaine, les incertitudes restantes sont encore nombreuses notamment dans le comportement hydrosédimentaire des vasières (sable/vase, consolidation) et concernant l'action de la végétation. L'effet de la végétation sera intégré par atténuation de l'intensité des écoulements et de la turbulence, et donc des taux de dépôt et de remobilisation, mais aussi plus directement par la fixation des sédiments dans le milieu racinaire (modèle de sol).

Impact du changement climatique sur l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Loire

Le modèle hydrosédimentaire opérationnel élaboré par Sogreah pour le compte du GIP Loire a pour but d'étudier l'estuaire aval, principalement à l'aval de Nantes. Le modèle existant permet de déterminer à l'échelle d'une année complète les processus liés aux particules fines, les particules sables étant considérées comme figées. Cette approximation est considérée comme satisfaisante au premier ordre pour l'étude du comportement actuel et à court terme de l'estuaire. Des méthodologies spécifiques ont ainsi été développées pour étudier certains

phénomènes long terme comme le changement climatique : la morphologie des fonds durs est fixée par dire d'experts selon les processus long terme a étudier. Sa cohérence hydraulique est vérifiée par modèle. Sur cette nouvelle morphologie, une analyse du comportement hydrosédimentaire de la vase est alors effectuée. Ainsi l'impact du changement climatique sur l'estuaire est qualifié sur les échelles de temps de 2040.
Si l'idéal est bien sûr une modélisation complète sable-vase sur les mêmes échelles de temps au moins, force est de constater que de nombreux progrès restent à faire. Nous proposons de progresser par étapes et de restreindre dans un premier temps les objectifs de l'étude détaillée de l'impact du changement climatique sur l'estuaire de la Loire à deux étapes clefs :

- l'intégration d'un modèle morphologique des fonds durs (Sables) pour sensiblement améliorer la qualité de l'évaluation des fonds durs à une échelle de temps donnée.
- L'intégration des progrès effectués sur les vasières dans l'action 3

Pour cela cette action sera développée en 4 étapes

1. Réalisation d'un modèle morphologique « sable » de l'estuaire y compris de l'amont de Nantes.
2. Affinement du scénario tendanciel 2040 actuel mis en place sur la Loire grâce au modèle morphologique sable
3. Etude de sensibilité sur ce scénario tendanciel aux incertitudes du CC (Hydrologie, niveau de la mer, effets des tempêtes, température principalement). Evaluation de différents scénarios CC selon les recommandations du GIEC (optimiste à pessimiste)
4. Etude pour chaque scénario du comportement des vases (bouchon vaseux, évolution morphologique des estrans, coin salé) sur la base du modèle hydrosédimentaire « vase » modifié par les apports obtenus de la tache 3 et en intégrant les effets attendus sur la végétation par dire d'experts.

Les différents éléments produits par les modèles permettront de fournir un retour d'expérience vers le modèle générique et les indicateurs à mettre en place.

Synthèse et transfert vers les gestionnaires
L'analyse des prévisions d'évolution du climat du GIEC permettra de définir une série de scénarios liés à l'amplitude des changements à prévoir (en terme de débits ou de montée du niveau de la mer par exemple). D'autres scénarios peuvent être envisagés dans le cas des estuaires, liés aux activités anthropiques qui conditionnent grandement leur fonctionnement (e.g. dragages, aménagement des berges, présence de végétation, gestion hydraulique des marais). Cette action définira ainsi quels scénarios supplémentaires examiner, en lien avec ce qui est connu des stratégies d'adaptation actuelles mises en œuvre par les gestionnaires (en particulier pour le cas de la Loire).
La déclinaison de ces différents scénarios, particulièrement au sein des actions 2 et 4, produira une quantité importante de résultats, qui devront être synthétisés afin d'être utilisables, en particulier par les gestionnaires (mentionnons par exemple l'augmentation du risque de submersion). Cette action s'attachera à définir des indicateurs pertinents permettant de produire cette synthèse.
Par ailleurs, la notion d'incertitude est essentielle au sein de toutes les études prospectives issues de l'application plus ou moins lointaine des prédictions d'évolution du climat du GIEC. Aux incertitudes initiales s'ajoutent les incertitudes liées à l'utilisation de modèles numériques (incertitudes liées aux hypothèses simplificatrices relatives aux processus et aux paramètres), à l'usage de conditions de forçages par essence incertaines (puisqu'il s'agit de projections), et dans le cas des estuaires schématiques, du degré de simplification choisi. Cette préoccupation relative aux incertitudes fait partie intégrante de chacune des actions, cette

action de synthèse se proposera de faire l'analyse des contributions respectives des incertitudes au cours des différentes étapes, et de mettre en relation les degrés d'incertitude liés à la modélisation schématique par rapport à la modélisation d'un estuaire réel (la Loire).
Enfin, c'est au sein de cette action que seront définies les différentes publications scientifiques issues du projet, et que sera abordée la valorisation des résultats auprès d'un public élargi (sous forme d'un document de synthèse ou d'une plaquette).

Projet JOHANNA (2010-2013) : analyse systémique des dommages générés par les vagues de tempête - application aux conséquences de la tempête Johanna (10-12 mars 2008)

Charlotte Vinchon[1], Camille André[2], Catherine Meur-Férec[2]
[1] BRGM/RNSC/RIC BP 36009, 45018 ORLÉANS CEDEX 2, c.vinchon@brgm.fr
[2] Géomer - UMR 6554 LETG, Institut Universitaire Européen de la Mer, Place Nicolas Copernic, Technopôle Brest Iroise, 29280 PLOUZANÉ, meurferec@univ-brest.fr

Introduction

Les dernières décennies ont vu l'augmentation des dommages et des coûts induits liés aux risques côtiers, résultat notamment de l'augmentation des enjeux sur un littoral de plus en plus peuplé et urbanisé (Meur-Férec et al, 2008). Par ailleurs, les scénarios de changement climatique global prévoient à l'horizon 2100 une élévation du niveau marin de l'ordre du mètre, ou plus, selon les auteurs et les modèles (IPCC, 2007 ; Rahmstorf, 2007 ; Hansen, 2007 ; Grinsted, 2010), qui augmentera encore l'exposition des enjeux actuels de la zone littorale aux aléas côtiers (Vinchon et al, 2009). A cela pourrait s'ajouter un possible accroissement sur l'Europe du Nord des événements climatiques « extrêmes » dont font partie les tempêtes tempérées.

L'analyse des dommages liés aux tempêtes est classiquement faite par les assureurs en comparant directement le coût des dommages à la vitesse atteinte par les vents (Bresch et al, 2000). Cependant, si le vent est l'aléa direct qui provoque une grande partie des dommages sur le tracé de la tempête, il est également par ailleurs le facteur déclenchant de forçages secondaires en générant des vagues de tempête qui viennent frapper les côtes.
Ces vagues se surimposent éventuellement à une surcote atmosphérique et des conditions de marées de vives eaux, comme ce fut le cas lors de la tempête Johanna du 10 au 12 mars 2008 et plus récemment lors de la tempête Xynthia le 28 février 2010.

Dans un objectif de prévention et de réduction du risque liés aux tempêtes côtières, il importe de mieux comprendre le phénomène des « vagues de tempête », afin de reconnaître les dommages spécifiques à cet aléa et de pouvoir les discriminer.
Le projet JOHANNA a pour objectif d'analyser les processus de propagation des vagues de tempête et les dommages induits. Il est réalisé dans le cadre d'un partenariat financier et scientifique entre la Fondation de recherche MAIF ; l'UBO et le BRGM.

État de la question

Dans le monde de la recherche, les travaux sur les risques naturels ont pris une grande ampleur depuis les années 1980, que ce soit en sciences de l'ingénieur, en sciences naturelles ou en sciences humaines et sociales (Dauphiné, 2001 ; Dubois-Maury, 2001 ; Morel et al, 2006). L'approche des risques naturels par l'étude des dommages permet d'appréhender l'ampleur d'un évènement en intégrant à la fois les caractéristiques de l'aléa, des enjeux, de la sensibilité des populations et de l'organisation de la société (déclarations et indemnisation des dommages). Les dommages et leur analyse sont aussi naturellement le domaine des assureurs, de par leur vocation, selon certaines règles, à couvrir une partie des dégâts provoqués par les catastrophes naturelles.
Cependant, les travaux des assureurs se basent sur des corrélations statistiques entre vitesse du vent et coût des dommages (Bresch et al, 2000). Or, les processus et la typologie des

dommages causés par les vagues de tempêtes (chocs et érosion en façade maritime, submersion marine, transport de débris) sont différents de ceux causés par le vent.

Les dommages et les coûts causés par l'état de la mer sur la zone côtière nécessitent donc d'être discriminés de ceux créés directement par le vent. La démarche déjà utilisée dans le cadre d'autres risques naturels (séismes, mouvements de terrain, tsunamis), qui consiste à quantifier la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommages pour une typologie donnée, mérite d'être transposée et adaptée aux risques côtiers liés à des événements météo-marins.

Objectifs et structuration du projet

L'objectif du projet JOHANNA, en vue de la mise en place de mesures de prévention ou de réduction des dommages et d'adaptation aux conséquences du changement climatique, est de développer une méthodologie reproductible pour l'analyse des processus de dommages induits par les vagues de tempête. Cette méthodologie cherchera à faire émerger, aux différentes étapes de cette démarche, des indicateurs, quantifiables ou non, qui devront permettre de caractériser les aléas et les dommages, au regard des conditions de tempête en « entrée ».

Il apparaît dans un premier temps nécessaire de préciser la nature des aléas et des dommages induits spécifiquement par les vagues de tempête et d'étudier leurs liens. Il est donc proposé d'appliquer cette démarche sur la référence de la tempête Johanna, récente et dont les paramètres physiques aussi bien que les dommages générés sont bien renseignés.

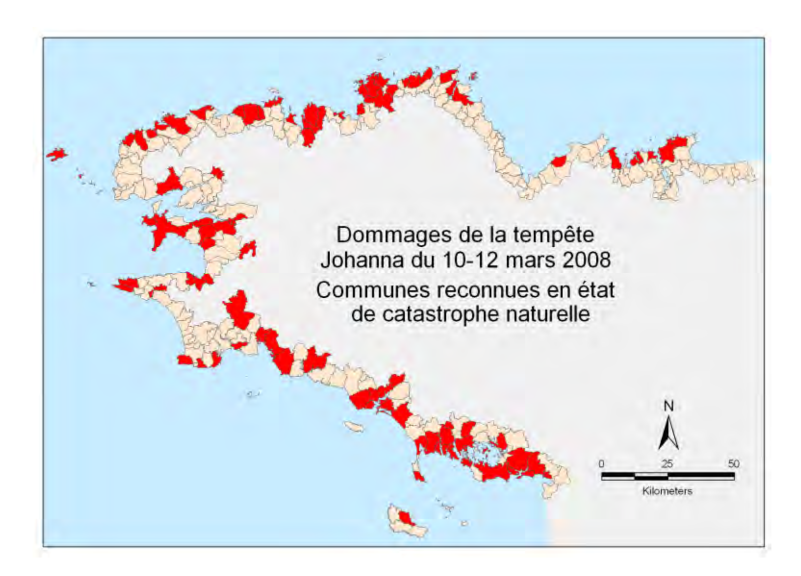


Figure 1 : Carte des 99 communes littorales bretonnes ayant fait l'objet d'un arrêté ministériel de reconnaissance de catastrophe naturelle suite à la tempête Johanna (en rouge)

La méthode proposée portera à la fois sur l'analyse de la propagation des vagues de tempête à la côte, dans un contexte météorologique et tidal extrême, et sur le lien entre les composantes de cet aléa et les dommages induits.

- La première tâche du projet consistera à identifier le (ou les) site(s) d'étude au regard de leur pertinence par rapport à l'évènement Johanna et de la disponibilité des données, tant en termes de données physiques (topo-bathymétrie, météorologie, hydrodynamique) que sur les biens endommagés (déclarations et constats de

dommages, indemnisations chiffrées des dommages assurés) et de la demande des utilisateurs finaux de ce travail (assureurs et services de sécurité civile).

- Il s'agira ensuite de caractériser les vagues de tempête (direction, hauteur de vague, période, énergie) avec les modèles météorologiques et hydrodynamiques existants, à partir des conditions de vent, de pression atmosphérique et de marée connues lors de la tempête Johanna. Les chaînages de modèles mis au point dans le cadre des projets de recherche ANR VULSACO et MISEEVA pourront être utilisés pour cette tâche.

- L'analyse de l'aléa croisera ces données d'entrée avec les observations et les données collectées sur le terrain par les chercheurs du laboratoire Géomer, pendant ou après la tempête, afin de valider les modélisations. Il s'agira ensuite d'identifier ou d'élaborer des indicateurs si possibles quantifiables des différentes composantes de l'aléa : chocs liés à l'énergie des vagues, érosion et transport de sédiment, hauteur, extension, vitesse et durée de l'inondation, etc… La composante « transport de débris » sera décrite qualitativement sur la base d'observations et des constats.

- L'analyse des dommages en lien avec l'aléa sera basée sur une synthèse des observations faites au sortir de la tempête par les scientifiques, les élus locaux, les services de sécurité civile, de l'État et les assureurs. Il s'agira de créer une typologie des dommages et des différents processus d'endommagement, notamment en transférant la démarche utilisée pour l'analyse des dommages sismiques au bâti aux aléas côtiers. Dans la mesure du possible, les dommages seront quantifiés, en se focalisant notamment sur la valeur des dommages assurés. Les fonctions d'endommagement des enjeux par les différentes composantes de l'aléa seront élaborées.





Figure 2 : Photos de dommages causés par la tempête Johanna dans les Côtes d'Armor (Trégastel) et dans le Finistère (Saint-Guénolé - Penmarc'h), © Alain Montule, Gaël Kervarec et Le Télégramme

- Enfin, une évaluation de la probabilité de retour des conditions combinées de tempête et de marée sera réalisée. Cette étape consistera à croiser les notions de périodicité de retour des forçages et de l'aléa, mais aussi des impacts matériels ou humains.

La synthèse de cette analyse systémique de l'aléa vagues de tempête intégrera une cartographie SIG ainsi que la définition des indicateurs identifiés. Les différentes étapes de l'analyse seront replacées dans un cadre conceptuel, afin de garantir la reproductibilité de la méthode à d'autres évènements ou d'autres sites, dans le but de disposer d'un outil d'analyse simplifiée de la vulnérabilité du littoral aux vagues de tempêtes. Le volet « analyse des dommages » est l'objet d'une thèse de doctorat, qui sera soutenue au terme du projet et dont les résultats seront intégrés dans le rapport du projet.

La méthodologie développée sera diffusée au sein de la communauté scientifique sous forme de publication(s) scientifique(s) et de communications lors de conférences consacrées aux risques naturels. La synthèse de l'étude sera également destinée aux assureurs et aux gestionnaires des risques côtiers, pour soutenir leurs démarches de prévention, de réduction du risque face aux vagues de tempête et de communication sur ce type d'évènement.

Conclusion

Le projet JOHANNA propose une démarche innovante grâce à une approche systémique reposant sur le croisement de données afférant à l'aléa et de données relevant des dommages. Le caractère novateur de cette étude repose sur une recherche de qualification (indicateurs) voire de quantification des dommages, ainsi que sur la reproductibilité de la méthode mise en place à d'autres sites et d'autres évènements de tempête. Enfin il réside également dans le croisement original d'approches émanant du domaine scientifique (pluridisciplinaire) et de données relevant du domaine des assurances.

En plus de l'élévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique, l'un des forçages qui sera à considérer pour évaluer l'évolution des aléas côtiers dans le futur, est la variation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, ainsi que son effet sur les vagues et sur les dommages qu'elles peuvent entraîner. On dispose d'une connaissance plus ou moins complète des caractéristiques des tempêtes historiques, mais limitée dans le temps, ces données ne permettent pas à ce jour de définir l'évolution de la fréquence et de l'intensité des tempêtes dans le siècle à venir. Cependant, une base de connaissance sur les processus du phénomène « vagues de tempête » permettra de définir l'aléa actuel et éventuellement futur, quand des tendances sur l'évolution de ces forçages seront mieux connues.

Références

Bresch, D., N., Bisping, M. et Lemcke, G., 2000. Les tempêtes en Europe, un risque sous-estimé. Swiss-Re publishing, 27p.

Dauphiné, A., 2001. Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer. Paris, Armand Colin, Coll. « U Géographie », 288p.

Dubois-Maury, J., 2001. Les risques naturels, quelles réponses ? Paris, La Documentation Française, Coll. Problèmes Politiques et Sociaux, n°863, 88p.

Grinsted, A., Moore, J.C. and Jevrejeva, S., 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. Climate Dynamics, vol. 34, n°4, p. 461-472.

Hansen, J.E., 2007. Scientific reticence and sea level rise. Environmental Reearch Letters, 2, 024002, 6p.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 996p.

Meur-Férec, C., Deboudt, P. and Morel, V., 2008. Coastal risks in France: an integrated method for evaluating vulnerability. Journal of Coastal Research, vol. 24, n°2B, p. 178-189.

Morel, V., Deboudt, P., Hellequin, A.-P., Herbert, V. et Meur-Férec, C., 2006. Regard rétrospectif sur l'étude des risques en géographie à partir des publications universitaires (1980-2004). L'Information Géographique, vol. 70, n°1, p. 6-24.

Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science, vol. 315, n°5810, p. 368-370.

Vinchon, C., Aubie, S., Balouin, Y., Closset, L., Garcin, M., Idier, D. and Mallet C., 2009. Anticipate response of climate change on coastal risks at regional scale in Aquitaine and Languedoc-Roussillon (France). Ocean and Coastal Management, vol. 52, n°1, p. 47-56.

A RISK BASED APPROACH FOR COASTAL RISK ASSESMENT: DEVELOPMENT OF AN INVERSE METHODOLOGY

Déborah, Idier[1], Jérémy, Rohmer[1], Victor Turpin[1] et Alexandre Magnan[2]

[1]BRGM, 3, av. C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, j.rohmer@brgm.fr
[2] Iddri (Sciences Po), 27, rue Saint-Guillaume, 75007 Paris

Abstract :
Basis for the development of a new methodology, risk-based, has been set-up. The principle is to start from a risk level acceptable by the society and to estimate the return period of this risk threshold. Some advantages and limits have been identified. A first practicability analysis has been done. The next step is to apply this method to a simple, but real, case.

Introduction
This last decade, extensive work has been done on coastal hazard estimation, coastal risk analysis, human sciences regarding risk and vulnerability. One approach to assess the risk is to use a direct method, hazard-based, starting from offshore conditions scenarios (combination of wave, tide and surge conditions), these scenarios being characterised by a return period, and to estimate the induced hazards (flooding), and finally the risk. Such approach has some limits. In the frame of climate change, such approach encounters difficulties for updating (limit n°1). Indeed, the knowledge of the forcing conditions (pressure and wind especially, which generates wave and surges) is evolving quite quickly, whereas the numerical modelling is quite computational time-consuming. A second limit (limit n°2) is that such approach makes the assumption that the return period of risk (or hazard) is equal to the return period of the offshore forcing conditions. However a same hazard can be due to different forcing conditions. A third limit (limit n°3) is that this type of approach can lead to neglect forcing conditions that are not dramatic individually, but that can lead to dramatic events when taking together (e.g. Xynthia event), inducing for example to neglect coastal defence system failures (e.g. Katrina event). Finally (limit n°4), are we sure that the final results answer to the need of risk management regarding the studied site? Indeed, many other drivers than just environmental ones are involved in decision-making, territorial planning and societal relationships. Therefore, what should be judged ―at stake” cannot be defined by solely taking into account the hazard dimension.
Some methods, which are still direct, but more focused on risks, have been already set up to overcome the limit n°2 (van der Most and Wehrung, 2005). The essence of the method is that various 'failure mechanisms' can initiate a flood: not only extremely high water levels, but also dike instability or failure. The probability of all failure mechanisms occur at the same time determines the risk of flooding in a dike ring and show where the relatively weak locations in water defences lie.
Regarding the limit n°4, less attention have been paid to really involve stakeholders from the first steps of the risk assessment process. More precisely, even if social scientists have done a lot of work, the links between them and risk analysis experts (hard sciences, engineering, etc.) is still poor. The reverse also is true. Consequently and although it is commonly advocated to associate stakeholders, their practical involvement in risk analysis needs specific methodological development (Renn, 2008).
Thus, an alternative approach, risk-based, could be to inverse the usual risk approach and to start from a level of risk which is really acceptable by the society (decision-makers, stakeholders and populations), to end up in the return period of this risk level. Such approach would allow identifying all the forcing conditions (and their occurrence probability) inducing

a threat for critic assets of the territory. In the present paper, we investigate the advantages and foreseen scientific and technical challenges of such approach. Especially, we will discuss the method which could be used for the critical (acceptable) risk identification and the mathematical inversion method.

Inverse method for risk assessment, and foreseen advantages

The figure 1 sums up the principle of the inverse method we propose. Currently, the risk is defined as: *risk = hazard × vulnerability*. It can be redefined as: *risk = frequency (return period) × gravity (damage)*, introducing the notion of gravity as the consequence of *intensity × vulnerability* and as an image of the damages that are recognized by the society as manageable. This definition allows to focus on the gravity of the flooding, and thus on the acceptable level of risk.

Regarding potential advantages of an inverse approach, we should notice that the final result is a return period. Further more within this approach, updating due to climate change appear quite easier since the occurrence frequencies are computed only at the end, after all the numerical computations. Such an approach also allows limiting the bias of having to select a priori a specific risk scenario, as it rather looks at every combinations which lead to the (un)acceptable level of risk. Thus, there is no a priori assumption overcoming the limits n°1 and n°2. Finally, the starting point is the acceptable risk, which induces a ―realistic" point of view of what is potentially threatened by hazards. Thus, the first step is to properly identify the system vulnerability, the tipping points of the system and finally the level of hazard that could be accepted for these tipping points. This could be a water height and a flooded duration. This both overcomes the limit n°3 and allows establishing pragmatic links between physical and social studies. What we argue here is that the inverse approach could help building interdisciplinary bridges.

The principle of inverse method looks quite promising for risk assessment. However, the complete method has to be developed and applied to better identify the practicability of such approach for real cases. Every step relies more or less on the same tool as for direct approaches (eg: statistical analysis, numerical modelling), at the exception of the vulnerability assessment and the inverse modelling. Thus, we explore the practicability of these two key points.

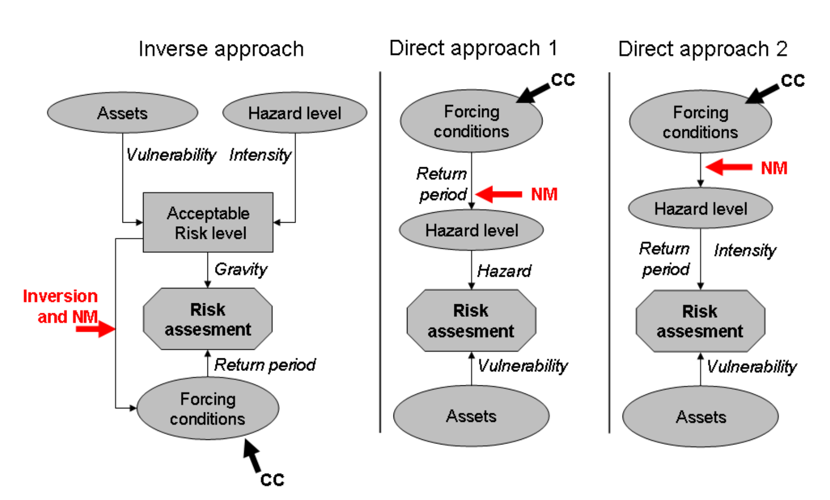


Figure 11 – Principle of inverse and direct approaches. CC: climate change, NM: numerical modelling.

Methods for vulnerability assessment

The first step in an inverse method consists in determining the acceptable level of risk. This has to be based on a vulnerability study. The main idea of the vulnerability step in the inverse method is to identify first the critical asset (which can be material and immaterial = what is of

value for the society), second all the related assets or network which could lead to a failure of the asset function.

Depending on time and space scale, several methods have been identified: functional analysis (Zihri, 2004), Analytical Hierarchy Process (Mendez Cabrera, 2010), stakeholder‘s perception (Poumadère et al, 2008), hot spots (Van der Veen and Logtmeijer, 2005), Community Vulnerability Assessment Tools (http://www.csc.noaa.gov/rvat/), structural network analysis (Gleyze, 2002). Among the studied vulnerability methods, at a community scale, it appears that an efficient method could be a combination of the stakeholder‘s perception and the functional analysis.

Inverse modelling

Let us formally define F as the model used for risk assessment so that $Y=F(X)=f(x_1, x_2,\ldots, x_N)$ where Y represents the calculated risk level and X represents the vector of the forcing conditions x_i (i=1 to N), which can be for instance the current magnitude, the water depth, the wind speed, etc. Given a level of acceptable risk R_c, the second step of the ―inverse method” consists in calculating the set of all vectors of forcing conditions $X^{(j)}$ so that $X^{(j)}=F^{-1}(R_c)$. This formal problem is referred to as the ―inverse problem of the contour R_c”.

For illustrative purposes, we consider the model F as the linear stability analysis model for the tidal seabed pattern generation (Idier et al., 2003), which calculates the sandbank spatial wavelength λ given the forcing conditions of the form X={current magnitude c (m/s) ; water-depth H (m)}. Let us consider the risk level R_c as the wavelength 10 000m. In particular the pairs {c_1=1.07 m/s; H_1=35 m}, {c_2=1.4 m/s; H_2=21.8 m} and {c_3=1.6 m/s; H_3=19 m} are specific solutions of the ―inverse problem of the contour R_c=10 000 m” as outlined in Figure 2A) and all the solutions correspond are graphically represented by the green contour.

Mathematically, such a ―inverse problem” can be solved in a forward manner consisting in the systematic forward evaluation of the model F using a regular grid in the two-dimensional forcing conditions space and in extracting the desired contour using for instance packaged software such as Matlab function *contourc*. The green contour depicted in Figure 2A) was calculated with a 100×100 regular grid, hence representing 10 000 model runs.

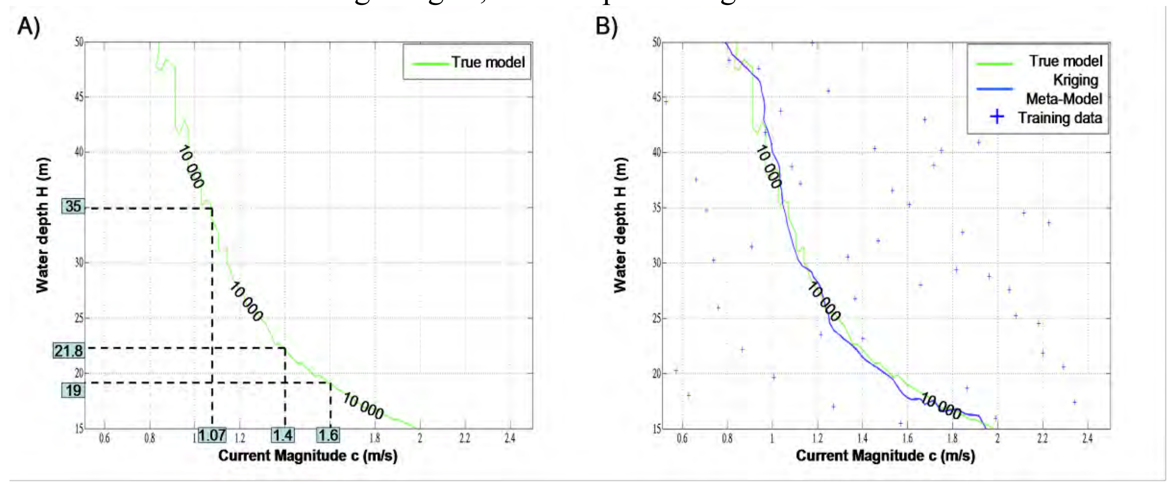


Figure 12 – A) Estimation of the combinations of current magnitude c (m/s) and water depth H (m) leading to the generation tidal sandbanks of 10 km wavelength using the true model with a forward grid-based approach (green contour); B) Estimation of the combinations using the kriging approximation (blue contour) constructed with 50 training data (blue cross-type markers).

Nevertheless, such an approach may be hardly feasible when considering computational time consuming models (with computer time cost varying from hours to days). In the present study, we propose a methodology using a single computer processor unit and relying on the

meta-modelling approach, which consists in replacing the complex model F by a mathematical approximation referred to as “meta-model” (e.g., polynomial function, radial basis functions, kriging,…etc.) Further details can be found in the recent overview of Forrester and Keane, 2009. The meta-model simulates the behaviour of the real phenomenon in the domain of the forcing conditions and predicts the model responses with a negligible computation time, hence rending straightforward the “forward grid-based approach”. The methodology can be stated as follows: Step 1: generate a limited number of pairs $X=\{c ; H\}$ and for each pair, calculate the corresponding wavelength λ using the “true” model F ; Step 2: use the resulting set of the form $\{X ; \lambda\}$ as a “training set” to “construct” the meta-model ; Step 3: solve the “inverse problem” in a forward manner using the low computer time cost meta-model and extract the contour.
Figure 2B) provides the contour for the wavelength value of 10 000 m using a “kriging” meta-model (Lophaven et al., 2002) constructed with a training set of 50 pairs $\{X ; \lambda\}$. It is worth noting that the approximation error (difference between the green and the blue contour in Figure 2B) is rather low. Hence, this methodology only requires 50 simulation runs to solve the “inverse problem” compared to the 10 000 runs directly using F.

Conclusions
Basis for the development of a new methodology, risk-based, has been set-up. Some advantages and limits have been identified. A first practicability analysis has been done. The next step is to apply this method to a simple, but real, case.

Acknowledgements
The authors thanks the ANR VMC 2006 project VULSACO n◦ANR-06-VULN-009, as well as the BRGM funded VULNERISK project, for contributions to the financial support of the present work.

References
Forrester A.I.J., Keane A.J. (2009) Recent advances in surrogate-based optimization, Progress in Aerospace Sciences 45 50–79.
Gleyze J. F. (2002) La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risque, PhD thesis, université Paris 7 Denis Diderot – Laboratoire COGIT.
Idier D. and Astruc D. (2003) Analytical and numerical modeling of large-scale rhythmic bedform dynamics, J. Geophys. Res., 108(C3), 3060.
Lophaven S.N., Nielsen H.B., Sondergaard J. (2002) DACE—A Matlab kriging toolbox, version 2.0. Technical Report IMM-TR-2002-12, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 28 pp.
Mendez Cabrera M. (2010) Changement climatique : Méthode d'évaluation du risque côtier face à l'élévation du niveau marin sur l'île de La Réunion, Master student report, M2 PRO « Espace & Milieux » UFR Géographie Histoire et Sciences de la Société.
Poumadère M., Mays C., Pfeifle G. and A.T. Vafeidis (2008) Worst case scenario as stakeholder decision support: a 5- to 6-m sea level rise in the Rhone delta, France. Climatic Change, 91:123–143.
Renn O. (2008) Risk Governance: Coping with uncertainty in a complex world. London: Eathscan, 455 pp.
Safecoast (2008) Coastal flood risk and trends for the future in the North Sea region, synthesis report. Safecoast project team. The Hague, pp. 136.
Van der Most H. and M. Wehrung (2005) Dealing with Uncertainty in Flood Risk Assessment of Dike Rings in the Netherlands, Natural Hazards (2005) 36: 191–206.

Van der Veen A. and C. Logtmeijer (2005) Economic Hotspots: Visualizing Vulnerability to Flooding, Natural Hazards, 36: 65–80.

Whitman R.V., Anagnos T., Kiorcher C.A., Lagorio H.J., Lawson R.S. and Schneider P., (1997) Development of a national earthquake loss estimation methodology, *Earthquake spectra*, vol. 13, n°4.

Zihri G. (2004) Risques liés aux ouvrages souterrains: constitution d'une échelle de dommages. PhD thesis, INPL / ENSMN-LAEGO, Ecole doctorale PROMEN, Spécialité: Génie civil - Hydrosystèmes - Géotechnique.

INFOLITTORAL-1 :
l'observation de la Terre au service de la dynamique côtière

Florence BAILLARIN[1], Damien GALARRAGA[2], Antoine GARDEL[3], François FROMARD[4], Jean-Marie FROIDEFOND[5], Virginie LAFON[6], Christophe PROISY[7], Romain WALCKER[4], Franck MERCIER[8], Olivier PRONIER[1], Aurélie DEHOUCK[1]

[1]Spot Image, florence.baillarin@spotimage.fr, olivier.pronier@spotimage.fr
[2]Nev@ntropic, dg.nev@ntropic.fr
[3]ULCO UMR LOG, antoine.gardel@univ-littoral.fr,
[4]CNRS UMR ECOLAB, fromard@cict.fr
[5] UB1 UMR EPOC, j.froidefond@epoc.u-bordeaux1.fr
[6]ADERA GeoTransfert, e.maneux@epoc.u-bordeaux1.fr
[7]IRD AMAP, christophe.proisy@ird.fr
[8]CLS, franck.mercier@cls.fr

Résumé :
Le projet Infolittoral-1 vise à développer une offre de service à vocation internationale pour la surveillance de l'environnement littoral et des activités anthropiques basée sur les technologies spatiales, et s'inscrivant dans un contexte de suivi des impacts du changement climatique.
Ce projet, dans sa première phase, va valoriser des innovations scientifiques et techniques (collaboration R&D, cellule de transfert de technologie et entreprises privées) dans les domaines du traitement des données spatiales d'observation de la terre et du développement des outils cartographiques d'aide à la décision.

Introduction

Les zones littorales sont des espaces privilégiés de développement des activités humaines (transformations, aménagements, modification des équilibres environnementaux). A l'interface océan/continent, elles sont également des zones particulièrement sensibles à l'évolution de contraintes globales, notamment liées au réchauffement climatique.
Le projet Infolittoral-1, subventionné par le Fonds Unique Interministériel est une étude pilote d'une durée de 24 mois qui rassemble des partenaires industriels (Spot Image, CLS), PME (Nev@ntropic), associatifs (G.E.O. Transfert/ADERA) et publics (UMR : EPOC - Bordeaux, AMAP - Montpellier, ECOLAB - Toulouse et LOG - Wimereux).
Il répond à la fois à un besoin en informations fiables mises à jour régulièrement et en connaissance des interactions qui existent entre les différentes composantes de l'environnement littoral. Il s'adresse aux gestionnaires et décideurs impliqués dans la modification ou la gestion de l'environnement littoral, afin de leur fournir les outils efficaces d'aide à la décision.

1. Objectifs

L'objectif premier **d'Infolittoral-1** est de définir des produits standards issus de l'imagerie satellitaire en complément des moyens traditionnels (mesures *in-situ*). Ces produits pourront être utilisés par :

1) Les scientifiques pour leurs activités de recherche ;
2) Les bureaux d'études mandatés par les décideurs ;
3) Les décideurs eux-mêmes dans le cas de produits satellitaires autonomes, par exemple dans le domaine de la sécurité.

Le consortium Infolittoral-1 va s'attacher à définir des produits images les plus adaptés aux stratégies de suivi multi-temporel des zones naturelles mais également de l'occupation des

sols à l'échelle saisonnière. Le but étant en grande partie de définir les paramètres biologiques (biomasse, espèce, couvert végétal …) de zones dont l'évolution, lente ou rapide, a un impact sur l'équilibre et la qualité de l'écosystème dans son ensemble.
Un objectif secondaire concerne la spécification d'un système d'information pour la gestion intégrée des zones côtières.

2. Les sites d'études

Dans un premier temps, deux chantiers pilotes ont été retenus dans le cadre de ce projet notamment pour la partie Recherche et Développement : les côtes de Guyane Française et le littoral Aquitain.

2.1 Le littoral guyanais

Encore peu industrialisée et relativement préservée, la côte guyanaise constitue une singularité mondiale en comparaison avec le niveau important de dégradation affectant les autres littoraux tropicaux. Cependant, les activités humaines s'y développent rapidement (urbanisation, pêche, aquaculture, élevage extensif de buffles, industrie pétrolière, etc.). Ce développement trop peu encadré fragilise déjà dans certaines régions les fonctions des écosystèmes littoraux et en particulier la mangrove (par exemple, capacité d'échanges entre écosystèmes terrestres et marins, habitats essentiels pour la biodiversité, nurseries pour les espèces d'intérêt halieutique, zones de ponte pour les tortues marines, nidification d'oiseaux marins…). Selon le scénario démographique intermédiaire de l'INSEE, la population serait multipliée par deux dans 20 ans. Les pressions sur le milieu littoral guyanais et ses ressources vont donc s'accroître augmentant ainsi le risque d'altération des fonctions citées plus haut.

La dynamique sédimentaire est très visible notamment sur les plages de Cayenne où le stock de sable, globalement constant car ‗emprisonné' entre une série de monts rocheux, balance d'un côté ou de l'autre de chaque anse en fonction de la phase hydro-sédimentaire en cours (Anthony et al. 2004).
Concernant la Mangrove, en Guyane, on commence à peine à comprendre les mécanismes qui font que cet écosystème se pérennise naturellement dans un contexte érosif intense et répété (Proisy et al. 2009).
Enfin, la question des effets du changement climatique dans cette région n'a été que très peu abordée. La modélisation climatique en cours de réalisation par Météo-France, indiquerait un changement des régimes de pluies (saison humide plus courte, pluviométrie diminuée annuellement mais avec des épisodes de pluies plus intenses). Cela ne resterait pas sans conséquences sur les régimes de débit des fleuves et sur la dynamique du littoral, le trait de côte, la résilience des écosystèmes littoraux, la biodiversité et les ressources halieutiques (Vendeville et al. 2006). Enfin, la pêche dans la zone côtière fournit le marché local guyanais et un fort potentiel de développement existe (Blanchard et al. 2004).

Pour une gestion côtière efficace, rentable et durable, il faut donc intégrer un ensemble de connaissances des processus physiques et écologiques. Il est urgent de disposer de méthodes reproductibles permettant de suivre l'évolution des caractéristiques des mangroves et vasières en particulier.

Infolittoral-1 s'appuiera sur la station de réception SEAS, localisée en Guyane et capable d'acquérir des images dans toute la zone Caraïbes. L'ancrage dans leurs contextes géographiques et socio-économiques propres des outils de caractérisation et de suivi de l'évolution des facies littoraux, participera à une appropriation du projet par les partenaires destinataires des produits attendus. Couplé à la disponibilité en données satellitaires générées

par la station, cet ancrage représente un atout significatif pour une bonne réalisation et une pérennisation du projet.

2.2 Le littoral aquitain

D'un point de vue démographique, l'Aquitaine va voir sa population augmenter de 10% d'ici à 2030 et cela principalement dans les zones urbaines et littorales. Ainsi sur les quatre centres urbains promis au plus fort développement on trouve Bordeaux, Arcachon et Bayonne, augmentant les impacts potentiels des rejets urbains sur la qualité des eaux.

De plus, les bouleversements climatiques qui se manifestent soit par la montée du niveau marin, soit par la modification du régime des vents et des houles, mais également par l'intensité des précipitations, pourra avoir des conséquences sur l'éboulement des falaises rocheuses du Pays Basque (liée en grande partie à l'altération continentale des roches par hydrolyse), sur le recul du littoral sableux et l'érosion des plages touristiques du littoral girondin et landais, sur la protection des infrastructures portuaires (passes d'Arcachon et de la Gironde, port du Verdon, circulation maritime dans l'estuaire de la Gironde, etc.), et des villes littorale (Soulac, Biscarrosse, Capbreton), risque d'inondation dans les zones marécageuses et de faible altitude comme Bordeaux ou les communes du Bassin d'Arcachon, impact sur les activités ostréicoles dans le système lagunaire d'Arcachon et le rôle écologique du bassin.

De nombreuses activités scientifiques visent, d'une part, à mieux comprendre les processus en domaine littoral, notamment dans le but de modéliser et à terme de prévoir les modifications de l'environnement côtier et, d'autre part, à mettre au point des méthodes de cartographie opérationnelle des habitats côtiers. Ils poursuivent ainsi un double objectif fondamental et appliqué.

Les informations acquises depuis plus de 20 ans sur le littoral aquitain (Froidefond et al., 1991, 2002, 2005), ainsi que les nombreux partenaires de l'UMR EPOC (SIBA, IFREMER, CEMAGREF, SMIDDEST, LASAGEC, Conservatoire du Littoral) font de ce site pilote un atout intéressant pour la validation des produits et savoirs qui seront développés dans le cadre d'INFOLITTORAL-1.

3. Les thématiques abordées et l'utilisation des images satellites

Le projet Infolittoral-1 a pour objectif de privilégier une approche itérative en contact étroit et permanent avec les décideurs de la gestion du littoral en Aquitaine et en Guyane. Dans un premier temps, les acteurs guyanais et aquitain vont être rencontrés pour identifier les problématiques locales à aborder prioritairement. Les résultats de cette analyse des besoins permettrons d'inventorier les informations utiles et de planifier les étapes du projet jusqu'à la production des produits de géo-information retenus pour la description et l'analyse des questions littorales à traiter.

Les activités de R&D transverses en cours, en matière de forçage hydrodynamique et sédimentaire, géomorphologie côtière et occupation et utilisation des sols sur le littoral continental, menées actuellement par les partenaires Infolittoral-1, devraient permettre d'apporter les éléments techniques nécessaires à leur exploration.

La qualification des capteurs spatiaux et le choix des produits images seront proposés en particulier :

1) en fonction des problématiques retenues suite à la phase de recueils et de synthèse des besoins
2) en fonction des échelles spatio-temporelles auxquelles la dynamique peut être analysée afin de définir une couverture spatio-temporelle optimale des phénomènes analysés et de cerner les différentes pressions de l'échelle historique à l'échelle événementielle ;
3) en fonction des caractéristiques radiométriques des capteurs et des bases de données spectroradiométriques des littoraux (sédiments cohésifs et non cohésifs).

4. Conclusion et Perspectives

Les résultats attendus s'inscrivent dans une démarche innovante de mise à disposition de technologies nouvelles accessibles aux plus grand nombre d'utilisateurs. La validation de la complémentarité entre l'utilisation de méthodes traditionnelles et technologie spatiale, l'utilisation de données spatiales multi-source (optique et radar) couplées avec des mesures in-situ et l'adoption d'une démarche résolument orientée « utilisateurs » et non spécialistes de la télédétection, devraient permettre d'aboutir à la définition d'une offre de service type pour le suivi du littoral, constituant la première étape avant de déployer un service opérationnel à l'horizon 2015.

5. Bibliographie

Anthony, E. J. and F. Dolique (2004). The influence of Amazon-derived mud banks on the morphology of sandy headland-bound beaches in Cayenne, French Guiana: a short- to long-term perspective. Marine Geology, 208(2-4): 249-264.

Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Fromard, F. and Heuret, P., 2009. Mud bank colonization by opportunistic mangroves: A case study from French Guiana using lidar data. Continental Shelf Research, 29(3): 632-641.

Blanchard, F., Berthou, P., Daurès, F., Reynal, L., Rosé, J., Vendeville, P., 2004. Coastal fisheries assessment in Guadeloupe, Martinique and French Guyana : setting observatories. COASTFISH: small-scale coastal fisheries in Latin America and the Caribbean. Abstract and Poster.

Vendeville, P, Baudrier, J., Blanchard, F., Mangili, C., Achoun, J., Renaud, H., 2006. Étude des peuplements de juvéniles de poissons et de crevettes des fonds du littoral de Guyane.

Froidefond, J. M., M. Pujos and X. Andre (1988). Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana. Marine Geology 84(1-2): 19-30.

Froidefond J.M., Castaing P., Mirmand M., Ruch P., 1991. Analysis of the Turbid Plume of the Gironde (France) Based on SPOT Radiometric data. Remote Sens. Environment. 36: 149-163

Froidefond J.M., L.Gardel, D.Guiral, M.Parra, J.F.Ternon (2002). Spectral Remote Sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence. Remote Sensing of Environment. 80, 225-232Froidefond, J.M., Ouillon, S. (2005). Introducing a mini-catamaran to perform reflectance measurements above and below the water surface. Optics Express. 13(3), 926-936

Froidefond, J. M., F. Lahet, C. Hu, D. Doxaran, D. Guiral, M. T. Prost and J.-F. Ternon (2004). Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. Marine Geology 208(2-4): 153-168.

Fromard F., Puig H., Mougin E., Marty G., Betoulle J.L., Cadamuro L., 1998 - Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems : New data from french Guiana. Oecologia 115 (1 - 2) : 39 - 53.

LA VULNÉRABILITÉ DU LITTORAL DU BASSIN D'ARCACHON À LA SUBMERSION MARINE : LE PROGRAMME BARCASUB

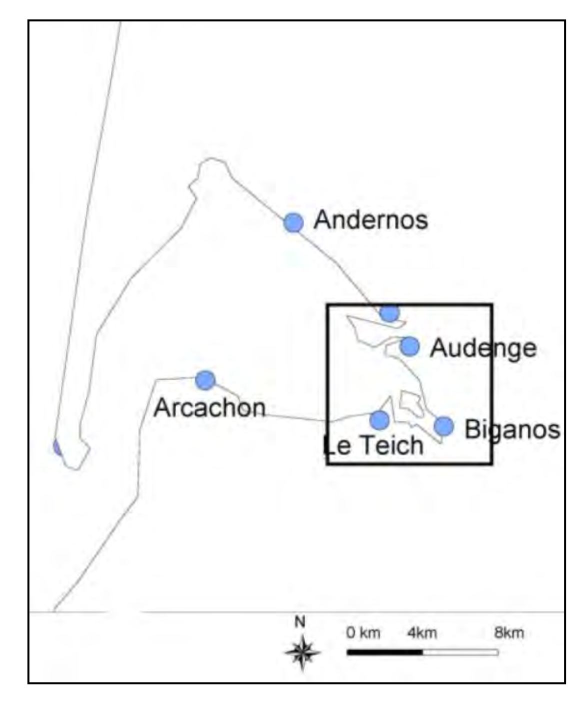
Frédéric Bertrand[1], Lydie Goeldner-Gianella[2]

[1]UMR 8586 Prodig CNRS, 2 rue Valette 75005 Paris, Frederic.Bertrand@paris-sorbonne.fr
[2]UMR 8586 Prodig, 2 rue Valette 75005 Paris CNRS, 75005 Paris, lydie.goeldner@free.fr

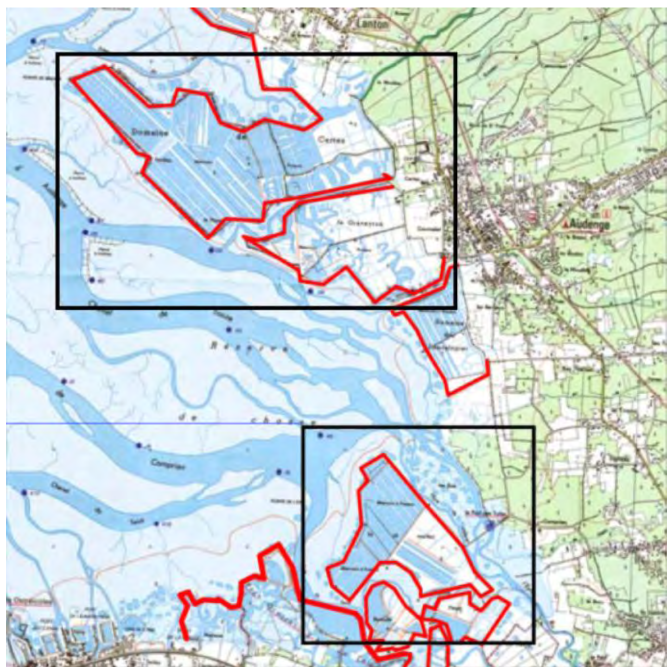
Abstract :
The inner shores of Bassin d'Arcachon lagoon, in SW. France, are physically and socio-economically vulnerable to accelerated sea-level rise and associated coastal flooding because of its low topography and the increase of both population and activities An original method for the assessment of vulnerability to coastal flooding is been implemented within the framework of the Liteau-BARCASUB research program. It simultaneously accounts the character, magnitude and frequency of coastal storms and variation to which the marsh biosedimentary system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity, including managed retreat strategy and tidal restoration inside the polders.

Introduction
Plusieurs événements tempétueux récents dont la tempête Xynthia (27-28 janvier 2010) ont révélé le potentiel d'endommagement de la submersion marine sur les rives du bassin d'Arcachon. La survenue rapprochée de ces événements destructeurs conjuguant marées, vagues et vents importants dans un contexte d'élévation du niveau marin et de poursuite de la littoralisation du bassin, conduit à envisager, dans le cadre du programme de recherche pluri-disciplinaire Liteau-BARCASUB (2009-2011) une réponse adaptative à long terme au risque de submersion fondée sur la dépoldérisation. Celle-ci s'appuie sur un diagnostic socio-environnemental conduite à partir d'une méthodologie d'analyse globale de la vulnérabilité.

I. Contexte du programme Liteau-BARCASUB
A la différence de la tempête Klaus (décembre 1999) qui avait essentiellement endommagé le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains, l'ensemble du pourtour du Bassin a été atteint durant Xynthia, des hauteurs d'eau maximales inférieures à 90 cm ayant été mesurées sur des distances atteignant plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres, en amont le trait de côte (S. Aubié *et al*., 2010).
Si le risque de submersion marine est désormais avéré sur l'ensemble du pourtour du bassin, les effets destructeurs des marées de tempête sont particulièrement marqués sur la rive orientale du bassin (Fig.1) exposée au plus long fetch et dont les marais salés frangeants ont largement régressé par le fait des endiguements passés et de l'extension de vastes domaines poldérisés (Certes, Graveyron, L'Escalopier, Malprat). C'est dans le cadre de ce secteur fonctionnel profondément transformé par les actions humaines où la déprise des activités traditionnelles (pisciculture) a permis d'engager à Graveyron un processus de réouverture accidentelle à la mer (Anselme *et al*., 2008), que le programme Liteau-BARCASUB a entamé une analyse du risque centrée sur la vulnérabilité des rives du bassin. L'approche pluridisciplinaire et participative du programme vise à permettre de définir des modes de gestion du risque de submersion adaptés localement à des combinaisons spécifiques de facteurs physiques et humains en évaluant, en particulier, la faisabilité de la dépoldérisation au regard des techniques traditionnelles de protection côtière.



Situation du fond du bassin lagunaire



Les domaines endigués du fond du bassin d'Arcachon,

Figure 13 : Localisation des sites d'étude du programme Liteau-BARCASUB

L'appropriation par les populations et leurs élus de ce mode de gestion du risque de submersion déjà opérationnel dans les pays riverains de la mer du Nord (Goeldner-Gianella, 2007) suppose outre une concertation élargie sur les enjeux de la protection des rives du bassin, une évaluation précise des conditions de préservation des marais littoraux qui frangeant et protègent encore localement la rive orientale du bassin.

II. Méthodologique d'analyse globale de la vulnérabilité

L'approche méthodologique du risque de submersion marine des rives du bassin d'Arcachon et de leurs rives s'inspire d'une approche développée par l'Institut de l'environnement de Stockholm (SEI) à propos des aspects humains du changement climatique. Si l'on se réfère à la définition générale proposée par Turner *et al*. (2001), la vulnérabilité à la submersion marine peut-être être conçue comme la propriété émergeante de systèmes couplés homme / environnement, considérés comme des ensembles d'éléments et de processus sociaux et biophysiques interactifs plus moins intégrés. S'appuyant sur les concepts écologiques de susceptibilité et de résilience, le modèle d'analyse SUST (*SUSTainibility*) apparaît particulièrement adapté à l'analyse et la gestion des risques côtiers en ceci qu'il permet de dépasser l'opposition entre vulnérabilité biophysique et vulnérabilité sociale tout en jetant un pont entre l'étude fonctionnelle de la vulnérabilité, axée sur l'origine de cette propriété, et une approche territoriale essentielle pour rendre compte de sa variabilité spatiale et temporelle.

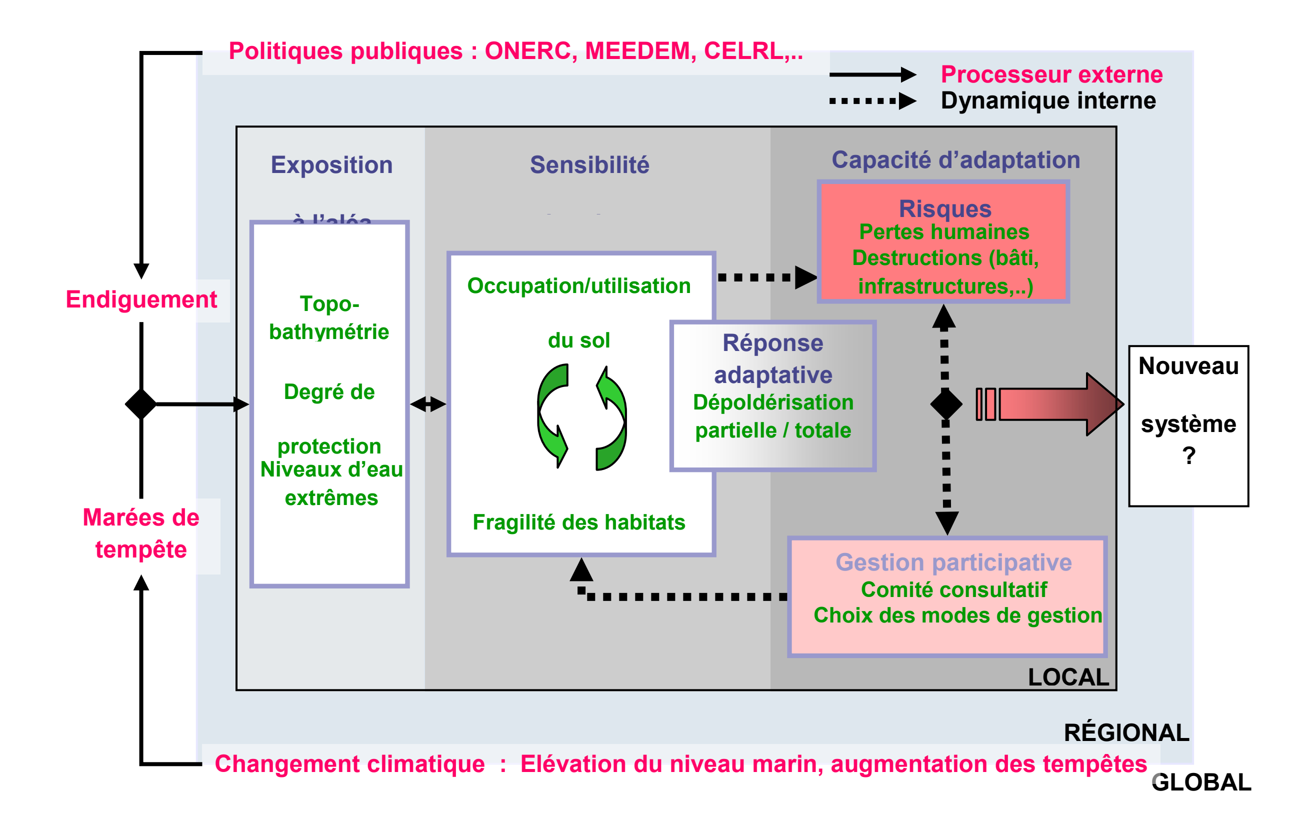


Figure 14 : Mode d'analyse de la vulnérabilité à la submersion des rives du bassin d'Arcachon

Le diagnostic de vulnérabilité aux submersions marines entamé dans le cadre du programme Liteau-BARCASUB se fonde sur l'analyse des trois variables déterminant le potentiel d'endommagement (ou de préservation) des marais frangeant les rive interne du bassin :1. la submersibilité des sites définissant leur exposition à l'aléa, 2.l'accrétion sédimentaire au front des schorres déterminant la « résistance » potentielle des marais aux effets destructeurs – érosifs et submersifs - des marées de tempêtes et 3. la dynamique de conquête/reconquête de la végétation halophile dans les secteurs où les actions humaines (réservoirs à poisson, mares de ont contribué à une forte dégradation des schorres naturels.

Ces trois variables déterminent l'équilibre dynamique du système des marais lagunaires aussi bien que leur capacité à perdurer au-delà des perturbations occasionnés par les épisodes tempétueux[16] dans un contexte de relèvement du niveau marin propice en soit à des processus de redistribution du stock sédimentaire au sein du système lagunaire arcachonnais.

Un des objectifs du programme Liteau-BARCASUB étant d'analyser les mécanismes de l'interaction végétation-sédimentation qui règlent la dynamique sédimentaire des estrans (Bonnot-Courtois & Levasseur, 2002, Arnaud-Fassetta *et al.,* 2006), les différents sites retenus ont été équipés de dispositifs expérimentaux de mesure de la sédimentation. Dix transects calés altimétriquement ont été établis en front de marais poldérisé et choisis en fonction de leur représentativité des situations de progradation (vers l'aval) ou de rétrogradation (vers l'amont) des géofaciès de marais avec, dans ce cas, possibilité de recolonisation par le marais salé de vasières anciennement soustraits au domaine maritime. Ainsi sur le front de l'île deltaïque de Malprat, sept transects ont été établis à travers l'espace laissé à un schorre inégalement dégradé par le fauchage de la végétation et les points d'érosion créés latéralement par les tonnes, dans un cadre de fond de baie inter-distributaire

[16] Dans l'approche proposée, la vulnérabilité s'inscrit dans les conditions d'équilibre du système et non antérieurement (modèle *Pression And Release*) ou postérieurement (modèle *Risk-Hazard*) au déclenchement des facteurs perturbateurs.

soumise à une sédimentation vaseuse intense. Cinq autres profils topographiques dans réservoir à poisson désormais reliée à la baie inter-distributaire et offrant un nouvel espace disponible à la sédimentation. Trois transects ont également été établis en front du domaine endigué de Graveyron à l'intérieur duquel 3 profils avaient déjà été levés en 2003 pour dresser un état zéro de la topographie du site et mettre en place un suivi de la dynamique sédimentaire d'un ensemble fonctionnel de marais rendu à la mer dès 1996 (Anselme *et al.*, *op.cit.*).

III. L'accommodation, cadre intégrateur d'analyse de la vulnérabilité des rives à la submersion marine

Au-delà de l'acquisition de données visant à préciser les conditions stationnelles d'engraissement ou démaigrissement des marais salés, ces dispositifs de mesure *in situ* de la sédimentation conduisent à s'interroger sur les modalités de redistribution des sédiments à l'échelon non seulement des toposéquences (transferts transversaux), mais également des secteurs fonctionnels définis selon le compartimentage hydrodynamique du fond de la lagune et la configuration des cellules sédimentaires (transferts longitudinaux).

La notion d'accommodation, empruntée par Le Nindre *et al.*, (2006) aux concepts de stratigraphie séquentielle pour qualifier autour du bassin d'Arcachon, le comblement de le tranche d'eau disponible par les sédiments marins au niveau le plus élevé de la mer, se révèle ici particulièrement pertinente. En effet, si l'on considère l'accommodation dans son acception originelle c'est-à-dire comme l'espace disponible – naturel ou créé par l'homme - pour la sédimentation potentielle (Jervey, 1988, Kedziersky 2007) et contrôlant la répartition des sédiments dans le temps, on dispose d'un cadre d'évaluation spatio-temporelle de la vulnérabilité permettant d'intégrer les actions humaines dans les processus d'accentuation ou de réduction de la vulnérabilité.

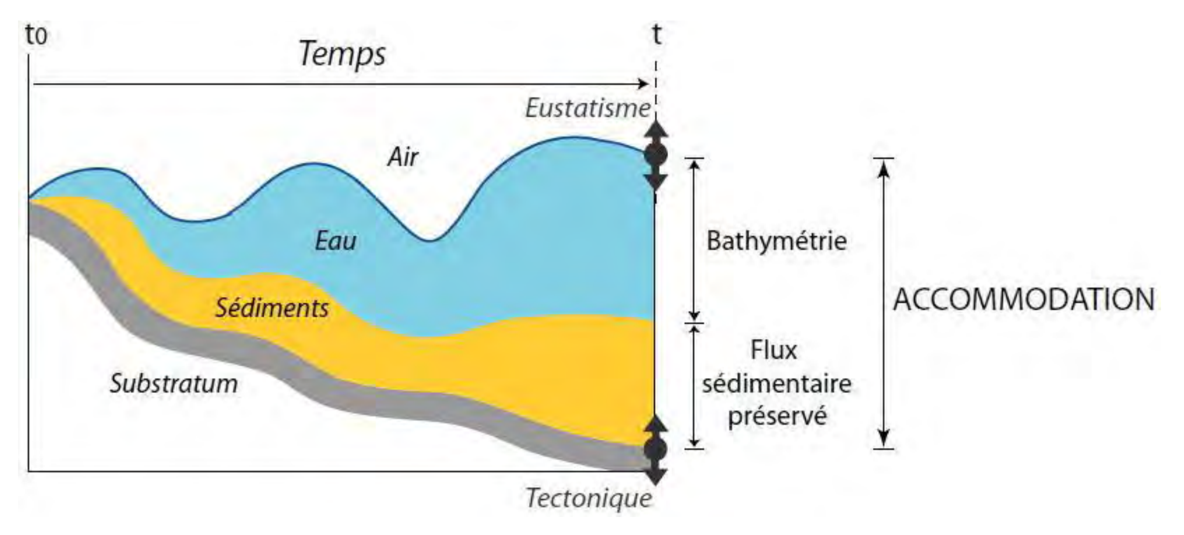


Figure 15 : Evolution théorique des variables sédimentaire et bathymétrique dans l'intervalle de temps [t_0,t] et l'espace d'accommodation créé par la réouverture à la mer d'un marais endigué (adapté d'après Kedziersky, 2007).

Cette approche dynamique paraît particulièrement adaptée à des situations comme celle du bassin d'Arcachon où scientifiques et gestionnaires sont amenés envisager une réponse adaptative au risque de submersion à travers la dépoldérisation, autrement dit, à travers la création d'un espace d'accommodation autorisant des migrations du système bio-sédimentaire des marais (Fig.3).

Conclusion

La mise en place d'une méthodologie d'analyse globale de la vulnérabilité à la submersion marine suppose de définir un cadre d'analyse spatio-temporelle des composantes de la vulnérabilité. Dans la perspective d'un retrait stratégique remettant en cause de la fixité du trait de côte, le concept géologique d'accommodation, permet d'envisager les migrations du système biosédimentaire des marais en réponse à une avancée contrôlée de la mer. Synthétisant les variations d'espace d'accommodation et de flux sédimentaire, les variations topo-bathymétriques des estrans constituent un descripteur essentiel des tendances évolutives du système. Le suivi de ces variations ainsi que de celles du couvert végétal des marais au droit des domaines endigués permettra de caractériser les modalités de migration des corps sédimentaires (rétrogradation, aggradation, progradation) dans l'espace d'accommodation nouvellement créé par la dépoldérisation.

Références bibliographiques

Anselme B., P. Durand, L. Goeldner-Gianella, F. Bertrand 2008. Impacts de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un marais maritime endigué : le domaine de Graveyron, bassin d'Arcachon (France), *VertigO, la revue des sciences en environnement*, 8 (1): 1-9.

Arnaud-Fassetta G, Bertrand F., Costa S., Davidson R., 2006, The western lagoon marshes of the Ria Formosa(Southern Portugal) : sediment-vegetation dynamics, long-term to short-term changes and perspective, *Continental Shelf Research*, 26, 363-384.

Aubié S, B. Daubet, J. Favennec, C. Mallet, J. Mugica(2010) – Compte-rendu des observations relatives aux impacts de la tempête Xynthia sur le littoral aquitain. Rapport final BRGM/RP-58511-FR, 40 p., 51 fig.

Bonnot-Courtois & J.-E. Levasseur, 2002, Mesures in situ de la sédimentation au front des schorres aux abords du Mont Saint-Michel, *Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier*, Anglet, France, 15-17 Mai 2002.

Goeldner-Gianella L., 2007. « Dépoldériser en Eruope occidentale ». *Annales de Géographie*, n° 656, 339-360.

Jervey M.T., 1988, Quantitative geological modeling of siliclastic rock sequences and their seismic expression. In Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendal C.G.St.C. et al.(Eds), 1988, Sea-Level Changes – An Integreted approach. SEPM Special Publication, 47-69.

Kedziersky P., 2007. Intégration de connaissances sédimentologiques et stratigraphiques dans la modélisation 3D des sédiments marins. Thèse Géosciences, Institut National de Lorraine, 150p.

Turner II B. L., R. E. Kasperson, P. A. Matson, J. J. McCarthy, R. W. Corell, L. Christiensen, N. Eckley, J. X. Kasperson, A. LuerseE, M. L. Martello, C. Polsky, Pulsipher A. & A. Schiller, 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science, *Proceedings of the National Academy of Sciences* of the United States of America, 100 (14): 8075-8079.

Le Nindre Y.-M., G.Bodéré, J.-L. Izac, E.Putot, J. Levasseur, 2006 - Etude pour le maintien de l'équilibre biosédimentaire des estrans de la côte sud du Bassin d'Arcachon. *Rapport BRGM/RP* 54814-FR. 129p. + 4 annexes.

ANNEXE

Journées Impacts du Changement Climatique sur les Risques Côtiers



15 et 16 novembre 2010 au BRGM-Orléans La Source



Programme

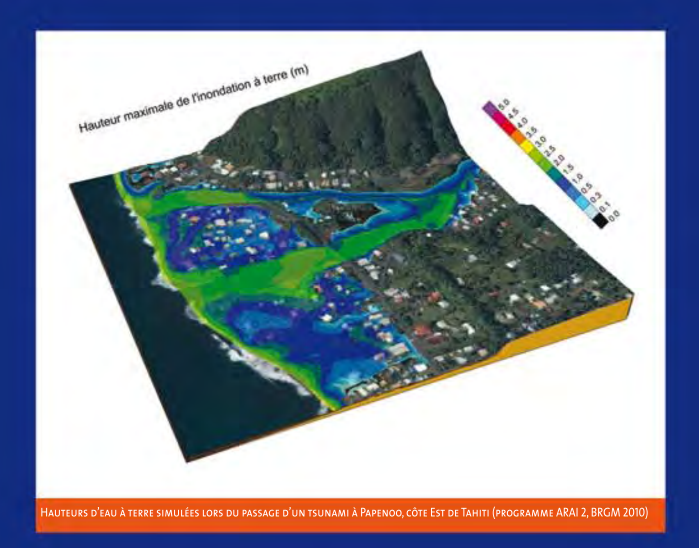
15 novembre 2010

8:30-9:30	ACCUEIL DES PARTICIPANTS		
9:30-9:35	Lenôtre Nicole - Chef d'unité Risques Côtiers BRGM		Introduction
9:35-9:50	Freyssinet Philippe - ANR		Ouverture du colloque
Thème 1 : Modifications des forçages (président de session : Delecluse Pascale - Météo France)			
9:50-10:10	Becker Mélanie (et al.)	LEGOS-CNES	Variations régionales du niveau de la mer reconstruites sur les 5 dernières décennies
10:10-10:30	Rogel Philippe (et Salas y Mélia David)	CERFACS	Modélisation du niveau de la mer dans les experiences decennales et centennales du modèle couple CNRM-CERFACS
10:30-10:50	Tibéri-Wadier Anne-Laure (Morellato David et al.)	CETMEF	Simulations des états de mer dans l'océan atlantique de 1960 à 2100 pour trois scénarios de changement climatique
10:50-11:20	Pause		
11:20-11:40	Charles Elodie (et al.)	BRGM	Tendances et variabilité des caractéristiques des vagues dans le Golfe de Gascogne de 1958 à 2001
11:40-12:00	Balouin Yann (et al.)	BRGM	Impact du changement climatique sur les événements de tempête affectant les littoraux européens, le projet MICORE
12:00-12:20	Le Cozannet Gonéri (et al.)	BRGM	Le projet CECILE : Changements Environnementaux Côtier, Impact de l'Elévation du niveau de la mer
12:20-12:40	Dubois Alexandre (et al.)	Univ. Bretagne Sud	Hydrodynamisme d'une plage de baie mésotidale en condition modales et en conditions de plus forte agitation (tempête Xynthia), Anse de Suscinio, Bretagne-Sud
12:40-14:10	Déjeuner		
Thème 2 : Impacts sur les aléas (président de session : Modaressi Hormoz - BRGM/RNSC)			
14:10-14:30	Idier Déborah (et al.)	BGRM	VULSACO - Vulnérabilité des systèmes côtiers sableux face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques : méthodes, outils, résultats et enseignements
14:30-14:50	Larroudé Philippe	LEGI Grenoble	La vulnérabilité aux changements climatiques avec une modélisation 2DH sur quatre plages françaises
14:50-15:10	Parisot Jean-Paul (et al.)	EPOC (Univ. Bordeaux 1)	Analyse de l'évolution de la plage du Truc Vert (Gironde) sur une période décennale ; liens avec la NAO
15:10-15:30	Maillet Grégoire (et Vella Claude)	LEESA (Univ. Angers)	Impacts de la diminution de la charge solide du Rhône sur la mobilité du trait de côte deltaïque depuis la fin du Petit Age Glaciaire
15:30-15:50	Vella Claude (et al.)	CEREGE	Méga-blocs de la bordure orientale du Golfe de Fos marqueurs de tempêtes exceptionnelles de sud-ouest
15:50-16:10	Pedreros Rodrigo (et al.)	BRGM	Mise en place d'une approche multi-modèles pour évaluer l'exposition du littoral languedocien aux submersions marines dans un contexte de changement climatique
16:10-16:30	Almar Rafael (et al.)	Univ. Santiago du Chili	Observation vidéo continue du littoral: multi échelles et multi processus
16:30-17:10	Session posters		
Thème 3 : Implications socio-économiques (président de session : Vanroye Cyril - DREAL LR)			
17:10-17:30	Ennesser Yves (et al.)	Egis BCEOM	Changement climatique et évaluation des risques côtiers en Afrique du Nord
17:30-17:50	Genovese Elisabetta (et al.)	CIRED	Assessment of damage from storm surge and sea level rise to coastal cities: lessons from the Miami area
17:50-18:10	Sauzeau Thierry (et Peret Jacques)	Univ. Poitiers	Construction et protection de l'environnement des communautés littorales du Centre-Ouest atlantique : l'apport de la géohistoire
18:10	Cocktail		

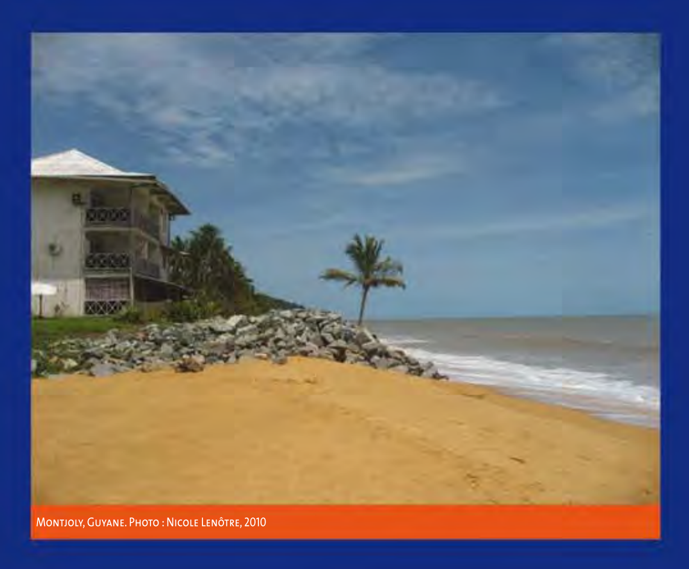
16 novembre 2010

8:30-9:10	**ACCUEIL DES PARTICIPANTS**		
Thème 3 (suite): Implications socio-économiques (président de session : Reysset Bertrand - ONERC)			
9:10-9:30	**Zaninetti Jean-Marc**	**CEDETE (Univ. Orléans)**	La prise en compte des effets du changement climatique dans les nouveaux schémas de protection du littoral en Louisiane et au Mississippi
9:30-9:50	**Vanroye Cyril**	**DREAL LR**	Coût de la protection côtière en Languedoc-Roussillon : quelle rentabilité ?
9:50-10:10	**Vinchon Charlotte (et al.)**	**BRGM**	MISEEVA : Vulnérabilité du système côtier à la submersion marine –Hypothèses et scénarios transdisciplinaires pour évaluer une vulnérabilité future dans le cadre d'un changement global
10:10-10:30	**Hérivaux Cécile (et al.)**	**BRGM**	Evaluation économique des dommages liés à l'élévation du niveau de la mer : démarche générale et application à la région Languedoc-Roussillon
10:30-10:50	**Rulleau Bénédicte (et al.)**	**REEDS (UVSQ)**	La perception de risque, une composante-clé de la vulnérabilité globale des zones côtières à la submersion marine. Application au littoral languedocien
10:50-11:30	**Session posters**		
Thème 4 : Transfert de la recherche vers l'appui aux politiques publiques (président de session : De Smedt Sylvie - DGPR)			
11:30-11:50	**Rey-Valette Hélène (et al.)**	**LAMETA (Univ. Montpellier 1)**	Quelles réponses des politiques publiques face à un risque de long terme ?
11:50-12:10	**Poumadère Marc et Bohn Bertoldo Raquel**	**Institut Symlog et ISCTE**	Gouvernance des risques climatiques et vulnérabilité du littoral : méthodologie du scénario, de l'atelier de parties prenantes et des représentations sociales
12:10-12:30	**Dévé Isabelle (et Bouteau Florence)-remplacées par Mallet Cyril**	**Conseil Régional Aquitaine**	ANCORIM, Atlantic network for coastal risks management - Réseau atlantique pour une meilleure gestion et prévention des risques côtiers
12:30-12:50	**Mallet Cyril (et al.)**	**BRGM**	L'Observatoire de la Côte Aquitaine, un exemple d'outil partenarial contribuant au suivi et à l'analyse de l'impact du réchauffement climatique sur le littoral
12:50-14:10	**Déjeuner**		
14:10-14:30	**Le Cozannet Gonéri**	**BRGM**	Résultats du GT risques côtiers du Groupe National Risques Naturels et Adaptation au Changement Climatique
14:30-14:50	**Sergent Philippe (et al.)**	**CETMEF**	Renforcement des ouvrages de protection marine vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans
14:50-15:30	**Pause**		
15:30-16:30	**TABLE RONDE**	**président : Vauclin Michel - ANR / participants : présidents des 4 sessions**	
16:30-16:45	**Rocchi Jean-François - PDG du BRGM**		**Clôture du colloque**

Galveston Island (Texas) lors du passage de l'ouragan Ike, septembre 2008 (David J. Philip)
Photo : David J. Philip



Hauteurs d'eau à terre simulées lors du passage d'un tsunami à Papenoo, côte Est de Tahiti (programme ARAI 2, BRGM 2010)



Montjoly, Guyane. Photo : Nicole Lenôtre, 2010

Wimereux, Côte d'Opale, février 1990
Photo : Jean Célié



Falaise de Criel-sur-Mer (Haute-Normandie). Photo : Thomas Dewez, 2006

► *Contacts*

n.lenotre@brgm.fr
Tél. : 02 38 64 37 22

t.bulteau@brgm.fr
Tél. : 02 38 64 39 45



ANR
212, rue de Bercy
75012 PARIS
Tél. : 01 78 09 80 00
Hotline Appels à projet : 0811 42 8000



BRGM
3, Av. Claude-Guillemin - BP 36009
45060 Orléans FRANCE
Tél. : 02 38 64 34 34
Fax : 02 38 64 35 18